Theorie

der

Centrifugal-Regulatoren.

Inauguraldissertation

zur Erlangung der

Doctorwürde in der Naturwissenschaft

unter dem Präsidium

von

Dr. E. v. Reusch,

o. ö. Professor der Physik zu Tübingen.

Vorgelegt von

Albert Wüst

aus Mergentheim.

STUTTGART.

Druck von Sailer & Mollenkopf.

1871.

Theorie

der

Centrifugal-Regulatoren.

Inauguraldissertation

zur Erlangung der

Doctorwürde in der Naturwissenschaft

unter dem Präsidium

von

Dr. E. v. Reusch,

o. ö Professor der Physik zu Tübingen.

Vorgelegt von

Albert Wüst

aus Mergentheim.

STUTTGART.

Druck von Sailer & Mollenkopf.

1871.

Einleitung.

Für alle Industriezweige, welche Dampf oder Wasserkräfte verwenden, ist es von grosser Wichtigkeit, den Zufluss des Motors so zu reguliren, dass trotz des fortwährend wechselnden Kraftverbrauches die Geschwindigkeit der Arbeitsmaschinen eine möglichst constante bleibt. Die Unveränderlichkeit der Geschwindigkeit ist aus vielen Gründen wünschenswerth; bei einigen Kraftmaschinen ist sie erforderlich, weil ihr Nutzeffect nur bei einer ganz bestimmten Geschwindigkeit sich dem Maximum möglichst nähert und bei Abweichungen von dieser Geschwindigkeit schnell abnimmt; bei anderen Kraftmaschinen würde zwar der Nutzeffect bei ziemlich grossen Abweichungen von der normalen Geschwindigkeit nicht wesentlich beeinflusst; aber die Grenze, innerhalb welcher sich die Geschwindigkeit ändern darf, ist je nach der Art der Arbeitsmaschinen oft sehr eng gezogen, z. B. bei Spinnereien, die sehr hohe Nummern spinnen.

In den meisten Fällen werden die Arbeitsmaschinen den noch zulässigen Grad der Ungleichförmigkeit bedingen.

Nennt man die Differenz zwischen der höchsten und niedersten zulässigen Geschwindigkeit, dividirt durch die mittlere Geschwindigkeit, den Ungleichförmigkeitsgrad, so darf derselbe betragen:

$^1/_5$ für Hammerwerke und ähnliche Maschinen;
$^1/_{20}$ — $^1/_{30}$ für Pumpen, Sägemühlen u. s. w.;
$^1/_{25}$ — $^1/_{35}$ für Mahlmühlen;
$^1/_{30}$ — $^1/_{40}$ für Webstühle und Papiermaschinen;
$^1/_{40}$ — $^1/_{60}$ für Spinnereien;
$^1/_{100}$ für Spinnereien mit sehr hohen Garnnummern.

Man hat bei einer Maschine zweierlei Ursachen der Ungleichförmigkdit zu unterscheiden und zwar:

Ungleichförmigkeiten in Folge zu grossen oder zu kleinen Zuflusses des Motors und

Ungleichförmigkeiten, die durch Mangel an trägen Massen erzeugt werden.

Bei einer vollständigen Maschine, bestehend aus Kraftmaschine, Transmission und Arbeitsmaschine ist blos dann ein vollkommen gleichförmiger Beharrungszustand denkbar, wenn sowohl Kraftmaschine, als auch Transmission und Arbeitsmaschine rotiren; in allen anderen Fällen kann blos ein ungleichförmiger Beharrungszustand eintreten, und es werden periodisch wiederkehrende Geschwindigkeitsänderungen vorkommen, die man durch träge Massen — bei rotirender Bewegung durch Schwungräder — ausgleicht. Als Beispiele lassen sich Mahl- und Sägmühlen anführen.

Wenn bei ersteren der Wasserzufluss und die Kornaufschüttung gleich bleibt, so wird ein gleichförmiger Beharrungszustand eintreten und träge Massen werden nicht nothwendig sein; nimmt man bei einer Sägmühle den Wasserzufluss und den Widerstand des Holzes auch constant, so wird doch in jedem Augenblick, während einer Umdrehung der Kurbelwelle, die Kraft am Kurbelzapfen sich ändern müssen, um dem Widerstande das Gleichgewicht zu halten; weil sich die Kraft am Umfang des Wasserrades aber nicht ändern kann, so wäre die unmittelbare Folge eine Beschleunigung, wenn der Widerstand kleiner wird als die Kraft, und eine Verzögerung, die mit Stillstand enden kann, wenn der Widerstand grösser ist als die Kraft. Die so entstehende Ungleichförmigkeit in der Bewegung der rotirenden Maschinentheile lässt sich durch Anbringung eines Schwungrades sehr vermindern, weil dieses mitbeschleunigt werden muss, wenn die Kraft grösser ist als der Widerstand, wodurch die Beschleunigung viel kleiner ausfällt, und weil es mit seiner, während der Beschleunigung gesammelten lebendigen Kraft über die Punkte weghelfen

kann, wo die Kraft dem Widerstande nicht mehr gewachsen wäre.

In weitaus den meisten Fällen, besonders bei Dampfmaschinen, sind Schwungräder zum Ausgleichen der, während einer Periode entstehenden Ungleichförmigkeiten nothwendig; und zwar müssen sie so construirt sein, dass bei constantem Widerstande die Ungleichförmigkeit nicht über den für die betreffenden Arbeitsmaschinen zulässigen Grad hinausgeht.

Wäre bei einer Maschine das Schwungrad so leicht, dass es den gewünschten Ungleichförmigkeitsgrad nicht einhalten kann, so müsste der Regulator während jeder Periode zweimal reguliren; einmal, wenn die Beschleunigung eintritt und einmal, wenn die Verzögerung eintritt, was in den meisten Fällen unmöglich ist, weil die Perioden so kurz sind, dass die Regulirung immer zu spät käme.

Die erste Bedingung zur Einhaltung einer gegebenen Geschwindigkeit ist somit das Vorhandensein genügend schwerer Schwungräder, weil der Regulator keine grössere Gleichförmigkeit erhalten kann als das Schwungrad.

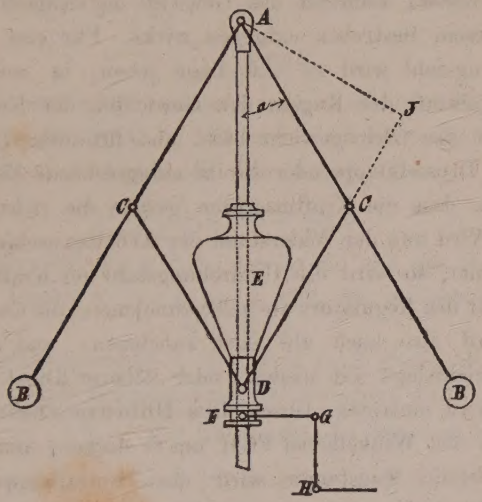
Tritt eine Zunahme des Widerstandes ein, welche unabhängig ist von den periodischen Ungleichförmigkeiten, so wird sie das Schwungrad durch seine lebendige Kraft zu überwinden suchen; die Geschwindigkeit wird dabei abnehmen und solange abnehmen, bis der Effect des Widerstandes sich ins Gleichgewicht setzt mit dem Effect der Kraftmaschine. Zur Vermeidung dieser Geschwindigkeitsabnahme ist es nothwendig, dass die Kraftmaschine einen grösseren Effect entwickelt, dass also der Zufluss des Motors vergrössert wird.

Beinahe alle Regulatoren sind unempfindlich für eine Ab- oder Zunahme des Widerstandes und reguliren blos, wenn wirklich eine Aenderung in der Umdrehungszahl eingetreten ist. Man hat je nach der zum Reguliren erforderlichen Kraft und den sonstigen Umständen verschiedene

Regulatoren construirt, wie Pumpen-, Gebläse-, Pendelregulatoren u. s. w., am einfachsten und verbreitetsten sind aber die Centrifugalregulatoren, von welchen im Folgenden allein die Rede sein soll.

Watt'scher Regulator.

Der Watt'sche Regulator ist der älteste Centrifugalregulator; er wurde von seinem Erfinder schon im Jahre 1781 an einer Balancierdampfmaschine angewendet.*)



Figur 1. zeigt denselben, wie er noch heutzutage im Gebrauche ist. Eine verticale Welle AF, welche von der Kraftmaschine in Drehung versetzt wird, hat an ihrem oberen Ende A einen Zapfen, woran die 2 Arme AB hängen, welche am Ende die Kugeln B tragen. E ist ein Gewicht, das sich an der Spindel AF auf- und abschieben

*) Nach Rühlmann's allgemeiner Maschinenlehre, Band I. Seite 410, soll dieser Regulator schon vor Watt an englischen Windmühlen im Gebrauch gewesen sein.

lässt, und von welchem aus die Zugstangen DC nach den Kugelarmen AB gehen. Die Hülse des Gewichtes wird bei F von einem Winkelhebel FGH umfasst, an dessen anderem Arme GH bei H eine Zugstange befestigt ist, welche auf irgend eine, von der Construction der Kraftmaschine abhängige Weise die Regulirung bewirkt.

Im Ruhezustand wird das Hülsengewicht sich natürlich so weit wie möglich senken, wenn aber die Spindel AF in Drehung versetzt wird, werden die Kugeln durch die entstehende Centrifugalkraft sich von der Drehachse zu entfernen streben, während das Gewicht der Kugeln und der Hülse diesem Bestreben entgegen wirkt. Für eine gegebene Umdrehungszahl wird es eine Lage geben, in welcher die Centrifugalkraft der Kugeln den Gewichten der Kugeln und der Hülse das Gleichgewicht hält, und für diese Lage wird man die Drosselklappe oder die ihr entsprechende Einrichtung so stellen, dass die Kraftmaschine gerade die richtige Kraft abgibt. Wird nun der Widerstand der Arbeitsmaschine grösser oder kleiner, so wird die Umdrehungszahl der Kraftmaschine und damit des Regulators ab- oder zunehmen, die Centrifugalkraft wird also auch ab- oder zunehmen, und eine neue Gleichgewichtslage mit niederer oder höherer Kugel und Hülsenlage wird eintreten. Durch diese Hülsenverschiebung wird sich auch der Winkelhebel FGH um G drehen, und die von H ausgehende Zugstange wird die Drosselklappe weiter öffnen oder mehr schliessen, so dass die Kraftmaschine, je nach Bedürfniss, mehr oder weniger vom Motor in sich auf nimmt, und also auch mehr oder weniger Kraft abgibt.

Es sei:

a = AB die Länge der Arme vom Punkt A bis zum Kugelmittel,

b = CD = AC die Länge der Hülsenstangen,

α = BAD = CDA der Ausschlagwinkel der Arme bei normaler Umdrehungszahl,

h = a cos α die entsprechende Aufhänghöhe der Kugeln,

$r = a \sin \alpha$ die Entfernung eines Kugelmittels von der Drehachse AF,

n die normale Umdrehungszahl des Regulators per Minute,

ω die derselben entsprechende Winkelgeschwindigkeit,

g die Beschleunigung beim freien Fall,

G das Gewicht einer Kugel B, und

Q das Hülsengewicht E;

dann ist die Centrifugalkraft einer Kugel

$$= \frac{G}{g} r \omega^2,$$

$$\text{oder weil } \omega = \frac{2 \pi n}{60} = \frac{n}{9{,}55}, \text{ und } r = a \sin \alpha,$$

$$= \frac{G n^2}{91{,}2 g} a \sin \alpha.$$

Diese Kraft wirkt horizontal nach aussen und ihr Hebelsarm für den Punkt A ist $h = a \cos \alpha$, somit das statische Moment der Centrifugalkraft einer Kugel:

$$= \frac{G n^2}{91{,}2 g} a^2 \sin \alpha \cos \alpha.$$

Das Gewicht einer Kugel ist = G, und der Hebelsarm r für den Punkt A $r = a \sin \alpha$, also das statische Moment

$$= G a \sin \alpha.$$

Das Hülsengewicht Q lässt sich in 2 gleiche Kräfte in der Richtung der Hülsenstangen DC zerlegen; die eine dieser Kräfte ist $= \frac{Q}{2 \cos \alpha}$; ihr Hebelsarm AJ für den Punkt A $= 2 b \cos \alpha \sin \alpha$ und das statische Moment derselben

$$Q b \sin \alpha.$$

Das Moment der Centrifugalkraft ist linksdrehend und die Momente der Gewichte sind rechtsdrehend, man hat somit die Gleichgewichtsbedingung

$$\frac{G n^2}{91{,}2 g} a^2 \sin \alpha \cos \alpha = G a \sin a + Q b \sin \alpha.$$

Aus dieser Gleichung findet man für einen gegebenen Regulator die Umdrehungszahl

$$n^2 = \frac{91{,}2 g}{a \cos \alpha} \left(1 + \frac{Qb}{Ga}\right) \quad \ldots \ldots \quad (1)$$

Wenn man in der Gleichgewichtsbedingung für $a \cos \alpha$

seinen Werth h substituirt, so findet man die, für eine gegebene Umdrehungszahl erforderliche Aufhänghöhe

$$h = \frac{91{,}2\ g}{n^2}\left(1 + \frac{Qb}{Ga}\right) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (2)$$

Aus Gleichung (2) ergibt sich auch unmittelbar

$$\frac{Q}{G} = \frac{a}{b}\left(\frac{n^2\ h}{91{,}2\ g} - 1\right) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (3)$$

Aus Gleichung (1) sieht man, dass ein Regulator bei gegebenen Diemensionen beliebig viele Umdrehungen machen kann, wenn man nur Q entsprechend wählt. Früher wurde dieses Gewicht Q so klein wie möglich gehalten, oder wohl ganz durch ein Gegengewicht balancirt, und dann konnte ein Regulator bei gegebenen Dimensionen und constantem Ausschlagwinkel nur eine Umdrehungszahl haben. Hat man z. B. einen Regulator ohne Hülsengewicht, für den $b = a$ und $n = 100$ sein soll, so wird nach Gleichung (2) die Aufhänghöhe $h = 0{,}0895$ Meter, eine Dimension, die so klein ist, dass man sie nicht brauchen kann, wenn nicht gleichzeitig sehr leichte Kugeln und eine ausserordentlich kleine Hülsenverschiebung genügen. Bringt man ein Hülsengewicht $Q = 9\ G$ in Rechnung, so wird die Aufhänghöhe $= 0{,}895$ Meter, und durch entsprechende Wahl von Q könnte man sie auf jede beliebige Grösse bringen.

Die Einführung dieses Hülsengewichtes verdankt man dem Amerikaner Porter, der es vor etwa 10 Jahren patentirte.

Wenn der Regulator eine Drosselklappe verstellen soll, so muss er auch für verschiedene Stellungen der Drosselklappe verschiedene Aufhänghöhen annehmen. Würde für die Kraftmaschine eine ganz constante Umdrehungzahl verlangt, so wäre es nach Gleichung (2) nicht möglich, mit diesem Regulator zu reguliren; da aber für alle Maschinen blos eine Umdrehungszahl verlangt wird, die innerhalb gewisser Grenzen bleiben muss, so darf auch der Regulator dem entsprechend seine Aufhänghöhe ändern.

Aus der Construction des Stellzeugs ist stets die für die Hülse nothwendige Verschiebung bekannt, und daraus lässt sich dann die Aufhänghöhe bestimmen, welche bei gegebenem Ungleichförmigkeitsgrade noch die nöthige Hülsenverschiebung gestattet.

Es sei:

v die zum Reguliren nothwendige Hülsenverschiebung.

n_1, n u. n_2 die grösste, mittlere und kleinste zulässige Umdrehungszahl des Regulators.

h_1, h u. h_2 die, diesen Umdrehungszahlen entsprechenden Aufhänghöhen.

$\delta = \frac{n_1 - n_2}{n}$ der Ungleichförmigkeitsgrad; dann sind nach Gleichung (2) die Aufhänghöhen für n_1 und n_2

$$h_1 = \frac{91{,}2\ g}{n_1^2}\left(1 + \frac{Qb}{Ga}\right)$$

und

$$h_2 = \frac{91{,}2\ g}{n^2_2}\left(1 + \frac{Qb}{Ga}\right)$$

und hieraus

$$h_2 - h_1 = 91{,}2\ g\left(\frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_1^2}\right)\left(1 + \frac{Qb}{Ga}\right).$$

Nun ist aber

$$n_1 = n\left(1 + \frac{\delta}{2}\right)$$

und

$$n_2 = n\left(1 - \frac{\delta}{2}\right)$$

also

$$h_2 - h_1 = 91{,}2\ g\ \frac{2\,\delta}{n^2\left(1 - \frac{\delta^2}{4}\right)^2}\left(1 + \frac{Qb}{Ga}\right)$$

oder, wenn man $\frac{\delta^2}{4}$ als sehr klein gegen 1 vernachlässigt:

$$h_2 - h_1 = \frac{91{,}2\ g\ 2\delta}{n^2}\left(1 + \frac{Qb}{Ga}\right);$$

nach Gleichung (2) ist

$$h = \frac{91{,}2\ g}{n^2}\left(1 + \frac{Qb}{Ga}\right),$$

also nach Substitution von h in die Gleichung von $h_2 - h_1$

$$h_2 - h_1 = 2\,\delta\,h.$$

Für den Ausschlagwinkel α ist die Entfernung des Punktes D der Hülse vom Punkte A

$$= 2\,b\,\cos\alpha = \frac{2\,b\,a\,\cos\alpha}{a},$$

und weil $h = a\,\cos\alpha$

$$= \frac{2\,b\,h}{a}.$$

Für die grösste Aufhänghöhe h_2 wird diese Entfernung $= \frac{2\,b\,h_2}{a}$; für die kleinste Aufhänghöhe h_1 wird sie $= \frac{2\,b\,h_1}{a}$, und die Hülsenverschiebung v, welche gleich der Differenz dieser Entfernungen ist, wird

$$v = \frac{2\,b}{a}\,(h_2 - h_1),$$

oder, wenn man für $h_2 - h_1$ seinen oben gefundenen Werth $2\,\delta\,h$ substituirt

$$v = 4\,\delta\,h\,\frac{b}{a} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (4)$$

und hieraus

$$h = \frac{v\,a}{4\,\delta\,b} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (5)$$

Nach dieser Gleichung ist die Aufhänghöhe zu bestimmen, wenn die Hülsenverschiebung gegeben ist; dann lässt sich bei Anwendung eines Hülsengewichtes die Umdrehungszahl noch beliebig wählen, während sie ohne Hülsengewicht durch die Aufhänghöhe gegeben ist.

Wenn der Regulator sich bewegen und die Hülse verschieben soll, so muss er den Widerstand überwinden, welchen das Stellzeug seiner Bewegung entgegensetzt, und die Bewegung muss eintreten, sobald die höchste oder niederste zulässige Geschwindigkeit erreicht ist, es muss also das Moment der Zu- oder Abnahme der Centrifugalkraft gleich dem Momente des Stellzeugwiderstandes sein.

Es sei:

R der auf die Hülse reducirte Widerstand des Stellzeuges,

dann zerlegt sich derselbe nach der Richtung der Hülsenstangen DC in 2 gleiche Kräfte $\frac{R}{2 \cos \alpha}$; der Hebelsarm AJ einer solchen Kraft für den Punkt A ist $= 2\ b \cos \alpha \sin \alpha$ und das statische Moment derselben

$$= R\ b \sin \alpha$$

die höchste zulässige Umdrehungszahl ist $= n \left(1 + \frac{\delta}{2}\right)$, die ihr entsprechende Centrifugalkraft

$$= \frac{n^2 \left(1 + \frac{\delta}{2}\right)^2 G}{91{,}2\ g}\ a \sin \alpha;$$

die Centrifugalkraft bei normaler Umdrehungszahl ist

$$= \frac{n^2\ G}{91{,}2\ g}\ a \sin \alpha,$$

somit die Zunahme der Centrifugalkraft

$$= \frac{n^2 \left(\delta + \frac{\delta^2}{4}\right) G}{91{,}2\ g}\ a \sin \alpha,$$

oder, wenn man $\frac{\delta^2}{4}$ als sehr klein gegen δ vernachlässigt

$$= \frac{n^2\ \delta\ G}{91{,}2\ g}\ a \sin \alpha \cdot$$

Der Hebelsarm dieser Kraft für den Punkt A ist $= h = a \cos \alpha$, und das Moment derselben:

$$= \frac{n\ \delta\ G}{91{,}2\ g}\ a^2 \sin \alpha \cos \alpha.$$

Dieses Moment dem Momente des Widerstandes R gleichgesetzt gibt:

$$\frac{n^2\ \delta\ G}{91{,}2\ g}\ a^2 \sin \alpha \cos \alpha = R\ b \sin \alpha$$

und hieraus das Gewicht einer Kugel

$$G = \frac{91{,}2\ g}{n^2\ \delta} \frac{b}{a} \frac{R}{a \cos \alpha} \quad \ldots\ldots \quad (6)$$

Substituirt man in Gleichung (6) den Werth von n^2 aus Gleichung (1) so findet man daraus den Ungleichförmigkeitsgrad

$$\delta = \frac{Rb}{Ga + Qb} \quad \ldots\ldots \quad (7)$$

Dieser Ungleichförmigkeitsgrad gilt nur für die mittlere

Stellung des Regulators und wird für jede andere Stellung desselben einen etwas anderen Werth annehmen.

Hätte man G statt für cos α für den kleinsten Werth von cos α d. h. für cos α_1 bestimmt, so wäre der Ungleichförmigkeitsgrad

$$\delta = \frac{Rb}{Ga + Qb} \frac{\cos \alpha}{\cos \alpha_1} \quad \ldots \ldots \quad (7a)$$

woraus man ersieht, dass δ für jeden Werth von α einen andern Werth annimmt, und dass man δ nur dann nach Gleichung (7) bestimmen kann, wenn man blos den Werth desselben für die mittlere Stellung sucht.

Nach Gleichung (3) hat man

$$\frac{Q}{G} = \frac{a}{b} \left(\frac{n^2 \, h}{91{,}2 \, g} - 1 \right)$$

und hieraus, wenn man für G seinen Werth aus Gleichung (6) substituirt und darin a cos α = h setzt:

$$Q = \frac{R}{\delta} \left(1 - \frac{91{,}2 \, g}{n^2 \, h} \right) \quad \ldots \ldots \quad (8)$$

Aus diesen 8 Gleichungen lassen sich nun alle Dimensionen für einen neu zu construirenden Regulator bestimmen; da aber die Umdrehungszahl und das Verhältniss $\frac{a}{b}$ der Wahl des Construirenden überlassen bleiben, so wird es sich fragen, wie man diese Grössen zu wählen hat, um bei Erfüllung der gegebenen Anforderungen den billigsten Regulator zu bekommen.

Der Preis eines Regulators setzt sich zusammen aus den Arbeitslöhnen für denselben, und aus dem Preise des verwendeten Materials.

Die Arbeitslöhne sind ziemlich gleich für eine gegebene Regulatorconstruction, ob der Regulator etwas grösser oder kleiner ist; dagegen nimmt der Preis des Materials mit dem Gewichte des Regulators zu.

Das Gewicht des Regulators zerfällt in das Gewicht von Ständer, Welle, Hebel, Arme etc., das sich nur wenig mit den Regulatordimensionen ändert, und in das Gewicht der

Kugeln und der schweren Hüsle, die sich je nach der Wahl von n und $\frac{a}{b}$ wesentlich ändern. Aus den Gleichungen (6) und (8) hat man dieses Gewicht

$$Q + 2\,G = \frac{R}{\delta}\left(1 + \frac{91{,}2\,g}{n^2\,h}\left(\frac{2\,b}{a} - 1\right)\right) \quad . \quad . \quad . \quad (9)$$

Man sieht aus dieser Gleichung, dass die Gewichtssumme $Q + 2\,G$ um so kleiner wird, je grösser man n wählt, und dass sie auch abnimmt, wenn man $\frac{a}{b}$ gross wählt.

Die Wahl von $\frac{a}{b}$ bedingt die Höhe des Regulators bei gegebener Aufhänghöhe h; wählt man $\frac{a}{b} = 1$, so wird die Höhe von A bis D $= 2\,h$; wählt man $\frac{a}{b} = 2$, so wird die Höhe AD $= h$, und wenn man $\frac{a}{b}$ noch grösser wählt, so ist die Aufhänghöhe h die Höhendimension. Geht man von v aus statt von h, so ist nach Gleichung (5)

$$h = \frac{v}{4\,\delta}\,\frac{a}{b},$$

also für $\frac{a}{b} = 1$

$$AD = 2\,h = \frac{v}{2\,\delta}.$$

Für $\frac{a}{b} = 2$ ist

$$AD = h = \frac{v}{2\,\delta}$$

Für $\frac{a}{b} = 3$ wird die grösste Dimension gleich der Aufhänghöhe also

$$h = \frac{3\,v}{4\,\delta}.$$

Die kleinste Höhe des Regulators für ein gegebenes v hat man also für die Werthe von $\frac{a}{b}$ zwischen 1 und 2; der Werth $\frac{a}{b} = 2$ hat aber den besonderen Vorzug vor allen andern Werthen, dass für ihn die Gleichung (9) in

$$Q + 2\,G = \frac{R}{\delta} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (10)$$

übergeht, dass also das Gesammtgewicht ganz unabhängig von der Umdrehungszahl des Regulators wird.

Mit Berücksichtigung dieser Umstände, nämlich:

1) der kleinen Regulatorhöhe,
2) des kleinen Regulatorgewichtes und
3) der Unabhängigkeit dieses Gewichtes von der Umdrehungszahl, wird man stets $\frac{a}{b} = 2$ wählen, wenn nicht ganz besondere Gründe eine andere Wahl passend erscheinen lassen.

Zum Schluss soll als Zahlenbeispiel die Berechnung des Regulators Fig. 1. folgen.

Für diesen, wie für alle übrigen abgebildeten Regulatoren sind genau die gleichen Annahmen gemacht, damit man dieselben bequem vergleichen kann.

Beispiel. Es sei gegeben:

die Umdrehungszahl $n = 100$;

der Ungleichförmigkeitsgrad $\delta = \frac{1}{50}$;

der Widerstand an der Hülse $R = 2$ Kilogramm.

die Hülsenverschiebung $v = 0{,}05$ m.

Wählt man $\frac{a}{b} = 2$, so ist nach Gleichung (5)

$$h = \frac{0{,}05 \cdot 2}{4 \cdot \frac{1}{50}} = 1{,}25 \text{ m}$$

nach Gleichung (6)

$$G = \frac{91{,}2 \cdot 9{,}81 \cdot 2}{10000 \cdot \frac{1}{50} \cdot 2 \cdot 1{,}25} = 3{,}58 \text{ Kilogramm.}$$

nach Gleichung (8)

$$Q = \frac{2}{\frac{1}{50}} \left(1 - \frac{91{,}2 \cdot 9{,}81}{10000 \cdot 1{,}25}\right) = 92{,}84 \text{ Kilogramm,}$$

nach Gleichung (9)

$$Q + 2G = \frac{2}{\frac{1}{50}} = 100 \text{ Kilogramm.}$$

Hätte man G für den kleinsten Werth von $\cos \alpha = 1{,}225$ m berechnet, so wäre $G = 3{,}65$ und $Q = 92{,}7$ und

daraus nach Gleichung (7 a) für die höchste Regulatorstellung $\delta = \frac{1}{50}$ für die niederste $\delta = \frac{1}{52}$.

Der Regulator Figur 1. ist nach den oben berechneten Maassen und Gewichten gezeichnet; hätte man unter sonst gleichen Umständen $\frac{a}{b} = 1$ gewählt, so wäre nach Gleichung (5)

$$h = \frac{0{,}05 \cdot 1}{4 \cdot \frac{1}{50}} = 0{,}625 \text{ m}$$

nach Gleichung (9)

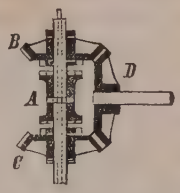
$$Q + 2G = \frac{2}{\frac{1}{50}}\left(1 + \frac{91{,}2 \cdot 9{,}81}{10000 \cdot 0{,}625}\left(\frac{2}{1} - 1\right)\right) = 114 \text{ Kilogr.}$$

Bei dem oben berechneten Regulutor würde für jede Umdrehungszahl $Q + 2G = 100$ Kilogramm; bei dem zweiten dagegen wird diese Gewichtssumme sich auch noch mit der Umdrehungszahl ändern, und wenn man $n = 50$ und $\frac{a}{b} = 1$ wählt, so wird für $h = 0{,}625$ m

$$Q + 2G = \frac{2}{\frac{1}{50}}\left(1 + \frac{91{,}2 \cdot 9{,}81}{2500 \cdot 0{,}625}\left(\frac{2}{1} - 1\right)\right) = 157{,}4 \text{ Kilogr.}$$

Man sieht aus diesen Beispielen, dass sogar für kleine Widerstände an der Hülse und für unbedeutende Hülsenverschiebungen die Regulatoren ziemlich grosse Dimensionen annehmen, und deswegen für grosse Widerstände und grosse Verschiebungen Dimensionen annehmen würden, welche die Regulatoren sehr theuer machen würden.

Für grosse Widerstände construirt man deswegen die Regulatoren gewöhnlich so, dass von der Hülse durch die hohle Spindel eine Stange herunter geht, welche bei A (Fig. 2.) durch einen Keil mit einer Hülse verbunden ist, die oben und unten Zähne hat, welche in entsprechende Zähne an den los auf der Spindel sitzenden Rädern B und C passen. Bei normaler Stellung des Regulators wird die gezahnte Hülse



in keines der Räder B und C eingreifen, und diese werden deswegen auch nicht an der Umdrehung der Spindel theilnehmen. Wenn sich aber der Regulator hebt, wird sich die Hülse mitheben und in das Rad B eingreifen, das nun an der Drehung theilnehmen und auch das Rad D mit seiner Welle in Umdrehung versetzen muss, bis der Regulator wieder in seine ursprüngliche Lage zurückkehrt und ausrückt.

Wenn der Regulator fällt, nehmen die Hülsenzähne das Rad C mit und setzen dadurch das Rad D in eine der vorigen entgegengesetzte Drehung. Lässt man nun von der Welle des Rades D aus mittelst eines Schraubenrades und einer Schraubenspindel, oder auf ähnliche Weise einen Schützen heben, oder eine Expansionsvorrichtung verstellen, so ist der vollständige Regulator fertig. Für diesen Regulator braucht man eine sehr kleine Hülsenverschiebung, und kann einen sehr grossen Widerstand überwinden, weil man den Weg, der dieser Arbeit entspricht, ziemlich gross wählen kann, und weil die Zu- oder Abnahme der Centrifugalkraft nicht diesen Widerstand selbst, sondern nur die demselben entsprechende Reibung in den Hülsenzähnen und dem Keile zu überwinden hat.

Alle oben gegebenen Formeln passen natürlich auch für diesen Regulator, und ein nach demselben construirter Regulator wird folgendermassen reguliren:

Der Widerstand der Arbeitsmaschine werde plötzlich verkleinert; dann wird die Kraft der Kraftmaschine zu gross für den Widerstand der Arbeitsmaschine. Die überschüssige Kraft wird dazu verwendet, das Schwungrad zu beschleunigen, und wenn es die höchste zulässige Geschwindigkeit erreicht hat, wird der Regulator sich heben, die Kupplung einrücken, dadurch die Welle des Rades D in Umdrehung versetzen und durch den mit der Welle verbundenen Regulirungsapparat, die Kraft mehr und mehr vermindern. Bis zu dem Zeitpunkte, wo die Kraft gleich dem Widerstande wird, muss das Schwungrad immer noch beschleunigt werden, und wenn

das Gleichgewicht zwischen Kraft und Widerstand eintritt, wird die Maschine noch zu schnell gehen, weil die lebendige Kraft des Schwungrades erst noch aufgezehrt werden muss; es wird also auch der Regulator immer noch in Thätigkeit bleiben und die Kraft noch mehr verkleinern.

Wenn endlich die höchste zulässige Umdrehungszahl wieder erreicht ist und der Regulator ausrückt, so hat er auch schon so weit regulirt, dass jetzt die Kraft für den Widerstand zu klein ist, dass also eine zu geringe Umdrehungszahl eintritt, und der Regulator wieder und immer wieder in Thätigkeit gesetzt werden muss.

Ein Zahlenbeispiel wird die Wirkungsweise am deutlichsten veranschaulichen.

Bei einer 30pferdigen Dampfmaschine, deren Schwungrad einen Ungleichförmigkeitsgrad $= \frac{1}{50}$ erlaubt, wird der Widerstand der Arbeitsmaschine um 3 Pferdekräfte verkleinert; wie wird der Regulator reguliren, der auch für einen Ungleichförmigkeitsgrad $\frac{1}{50}$ gebaut ist?

Das Gewicht des Schwungrades sei nach der Formel

$$G = 7000 \frac{N}{\delta \, n \, c^2}$$

bestimmt, wie sie Redtenbacher für 3fache Expension und eine sehr lange Schubstange angibt; dann ist, weil N die Pferdekraft der Maschine und c die Umfangsgeschwindigkeit des Schwungrades bezeichnet,

$$G = \frac{7000 \cdot 30 \cdot 50}{50 \cdot 100} = 2100 \text{ Kilogramm},$$

wenn man $c = 10 \frac{m}{}$ und $n = 50$ wählt.

Die Kraft der Maschine, auf den Schwungring reducirt, ist

$$= \frac{30 \cdot 75}{10} = 225 \text{ Kilogramm}.$$

Nimmt der Widerstand der Arbeitsmaschine um 3 Pferdekräfte ab, so ist die entsprechende überschüssige Kraft am Schwungradumfang $= 22{,}5$ Kilogramm. Diese Kraft erzeugt im Schwungrad eine Beschleunigung

$$f = \frac{P}{m} = \frac{22{,}5 \cdot 9{,}81}{2100} = 0{,}105 \frac{m}{};$$

nach 0,95 Secunden wird also das Schwungrad schon die höchste zulässige Geschwindigkeit $= 10\left(1 + \frac{1}{100}\right) = 10{,}1$ m erreicht haben, bei welcher der Regulator die Kupplung einrückt. Bis die richtige, dem Widerstande entsprechende Dampfmenge erreicht ist, soll es 2 Secunden dauern; dann ist während dieser Zeit die mittlere Beschleunigung blos noch die Hälfte und die Geschwindigkeit des Schwungrades nach Verfluss der 2 Secunden

$$= 10{,}1 + 2 \cdot 0{,}0525 = 10{,}205 \text{ m}.$$

Jetzt wäre das Gleichgewicht zwischen der Kraft der Kraftmaschine und dem Widerstand der Arbeitsmaschine hergestellt; das Schwungrad besitzt jedoch noch eine überschüssige lebendige Kraft

$$\frac{G}{2g}(c_1^2 - c^2) = \frac{2100}{19{,}62}(10{,}^2205 - 10{,}^21) = 227 \text{ Meterkilogramm},$$

welche die Geschwindigkeit so gross erhält, dass der Regulator die Kupplung noch nicht ausrücken kann. Nimmt man an, dass der Regulator in jeder Secunde seiner Einwirkung die Kraft um gleichviel vermindert, und dass die lebendige Kraft in t Secunden aufgezehrt sei, so ist, wenn nach der oben gemachten Annahme die Kraft in jeder Secunde 11,25 Kilogramm abnimmt, die mittlere Dampfkraft während dieser t Secunden

$$= \frac{202{,}5 + 202{,}5 - 11{,}25\ t}{2}$$

und die, der lebendigen Kraft entsprechende Kraft

$$= \frac{227 \cdot 2}{(10{,}205 + 10{,}1)\ t}.$$

Die Summe dieser beiden Kräfte muss gleich dem, sich nicht ändernden Widerstande der Arbeitsmaschine sein, also

$$\frac{202{,}5 + 202{,}5 - 11{,}25\ t}{2} + \frac{227 \cdot 2}{(10{,}205 + 10{,}1)\ t} = 202{,}5$$

und hieraus

$$t = 2 \text{ Secunden}.$$

In 2 Secunden ist also die höchste zulässige Geschwin-

digkeit von 10,1 $\frac{m}{}$ wieder hergestellt und die überschüssige lebendige Kraft aufgezehrt; aber gleichzeitig ist auch die Dampfkraft auf 202,5 — 11,25 · 2 = 179,5 Kilogramm gefallen, entsprechend 24 Pferdekräften, und die Folge wird ein Fallen der Geschwindigkeit sein, bis der Regulator wieder mehr Dampf zulässt und das ganze Spiel von neuem beginnt.

Etwas günstiger würde sich die Sache gestalten, wenn man den Regulator so eingerichtet hätte, dass er schneller regulirt.

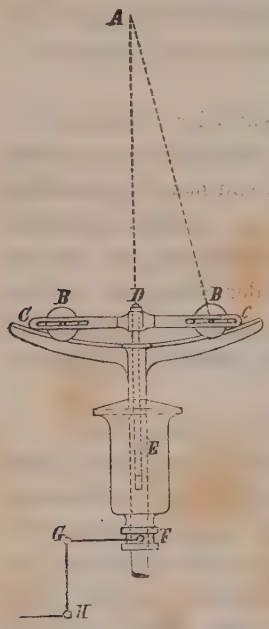
Hätte man die Einrichtung getroffen, dass der Regulator in 1 Secunde statt in 2 die richtige Dampfmenge herstellt, so würde schliesslich die Kraft der Maschine nur auf 186,3 Kilogramm fallen, entsprechend 24,8 Pferdekräften, aber die Folge wäre doch auch ein lange fortdauerndes Reguliren in entgegengesetzten Richtungen.

Diesem Uebelstande lässt sich nicht leicht abhelfen, weil er durch die lebendige Kraft des Schwungrades veranlasst ist, die man nicht entbehren kann, wenn man die geradlinige Bewegung eines Dampfkolbens in eine rotirende umsetzen will; aber selbst bei rotirenden Kraftmaschinen, wie Wasserrädern und Turbinen, ist die Zahl der Räder und anderer rotirender Massen so gross, dass sie auch als Schwungräder wirken und beim Reguliren ähnliche Erscheinungen hervorrufen wie Schwungräder.

In dieser Beziehung sind die Watt'schen Regulatoren, die fortwährend auf das Stellzeug wirken, viel besser, denn bei ihnen steigt der Regulator nur so lange, als das Schwungrad noch beschleunigt wird; ist aber einmal das Maximum der Geschwindigkeit eingetreten, was mit dem Momente zusammenfällt, in welchem das Gleichgewicht zwischen Kraft und Last hergestellt ist, so bleibt der Regulator auf seiner Höhe und es tritt kein zu grosses Absperren des Dampfes ein.

Parabolischer Regulator.

Der ununterbrochen auf das Stellzeug wirkende Watt'sche Regulator entspricht allen an ihn gestellten Anforderungen so vollständig, als es nöthig ist, aber er erfordert zu diesem Zwecke Dimensionen, die im Verhältniss zur Verschiebung so gross ausfallen, dass man ihn manchmal nicht mehr gut an Dampfmaschinen anbringen kann.



Diesem Uebelstand suchte Franke dadurch abzuhelfen, dass er einen Regulator construirte,*) dessen Kugeln bei gleicher Umdrehungszahl eine beliebige Höhenlage einnehmen können, der also bei nahezu geschlossener Drosselklappe ebensogut die normale Geschwindigkeit haben kann, wie bei ganz geöffneter Drosselklappe. Aus Gleichung (1)

$$n^2 = \frac{91{,}2\ g}{a \cos \alpha} \left(1 + \frac{Qb}{Ga}\right)$$

geht nämlich hervor, dass n bei jedem Ausschlagwinkel constant bleibt, wenn man a cos α d. h. die Aufhänghöhe für verschiedene Werthe von α constant erhalten kann, und diese Bedingung kann durch einen parabolischen Regulator erfüllt werden, wie derselbe in Fig 3. (etwas abweichend vom Franke'schen) abgebildet ist. Es wird bei demselben von der Kraft-

*) Zeitschrift des östreichischen Ingenieurvereins, Jahrgang 1849.

maschine eine hohle verticale Welle in Umdrehung gesetzt, an deren oberem Ende eine Führung sitzt, welche den Kugeln B gestattet, sich rollend auf derselben so von und zur Umdrehungsachse zu bewegen, dass die Kugelmittel in der Ebene der Führung eine Parabel beschreiben.

Durch die Kugelmittel gehen horizontale Zapfen, welche zu beiden Seiten in geradlinigen Führungen C rollen, die zusammen ein Stück bilden, in dessen Mitte von D eine Zugstange DE in die hohle Welle geht. Am untern Ende dieser Zugstange geht ein Keil durch dieselbe, der sich mit der Zugstange gegen die hohle Welle verschieben lässt und das, die Welle umschliessende Hülsengewicht E trägt. Bei F umfasst die Hülse ein Gabelhebel, der bei einer Verschiebung der Hülse sich um seinen Drehpunkt G dreht, und mit seinem andern Arm GH die Zugstange in Bewegung setzt, welche die Bewegung des Regulators auf das Stellzeug überträgt.

Es sei:

y die Entfernung einer Kugel von der Drehachse,

Q das Gewicht der Hülse E sammt Zugstange DE und Geradeführung CC.

p der Parameter der Parabel G, n, α, g, ω, v, δ und R wie oben (Seite 8 und 11),

a die kleinste Entfernung einer Kugel von der Drehachse.

Zieht man im Punkt B eine Normale AB auf die Parabel, in welcher sich die Kugeln bewegen, so ist die Subnormale AD der Parabel nach bekannten Gesetzen der Geometrie gleich dem Parameter p. Wählt man zur Aufstellung der Gleichgewichtsbedingung den Punkt A als Drehpunkt für die Momente der verschiedenen Kräfte, so ist der Hebelsarm für die Centrifugalkraft einer Kugel = p; die Centrifugalkraft der Kugel selbst, wie oben auf Seite 9 gezeigt wurde.

$$= \frac{n^2 \, y \, G}{91{,}2 \, g}$$

und das statische Moment derselben für den Punkt A:

$$= \frac{n^2 \, y \, p \, G}{91{,}2 \, g}$$

Die Schwerkraft, die in einem Punkt B wirkt, setzt sich aus dem Gewichte einer Kugel und dem halben Hülsengewicht Q zusammen; der Hebelsarm dieser Kraft ist für den Punkt A = y, und das statische Moment

$$= \left(G + \frac{Q}{2}\right) y$$

Da diese beiden Kräfte in verschiedenen Richtungen um A zu drehen suchen, so müssen ihre Momente gleich sein, wenn Gleichgewicht eintreten soll; daraus ergibt sich die Gleichgewichtsbedingung:

$$\frac{n^2\ y\ p\ G}{91{,}2\ g} = \left(G + \frac{Q}{2}\right) y$$

und hieraus

$$n^2 = \frac{91{,}2\ g}{p}\left(1 + \frac{Q}{2\,G}\right) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (11)$$

oder

$$p = \frac{91{,}2\ g}{n^2}\left(1 + \frac{Q}{2\,G}\right) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (12)$$

Soll der Widerstand des Stellzeuges an der Hülse überwunden werden, sobald die Geschwindigkeit sich bis zur höchsten oder niedersten zulässigen Geschwindigkeit ändert, so muss das Moment der Ab- oder Zunahme der Centrifugalkraft gleich dem Moment des Stellzeugwiderstandes an der Hülse werden. Von dem Widerstand R kommt auf jede Kugel $\frac{R}{2}$, und der Hebelsarm dieses halben Widerstandes ist für den Punkt A = y, also das Moment

$$= \frac{R\,y}{2}.$$

Die der höchsten zulässigen Geschwindigkeit entsprechende Centrifugalkraft ist

$$= \frac{n^2\left(1 + \frac{\delta}{2}\right)^2 y\ G}{91{,}2\ g};$$

der normalen Geschwindigkeit entspricht eine Centrifugalkraft

$$= \frac{n^2\ y\ G}{91{,}2\ g}$$

die Zunahme der Centrifugalkraft ist somit

$$= \left[\left(1+\frac{\delta}{2}\right)^2 - 1\right] \frac{n^2\ y\ G}{91{,}2\ g},$$

oder nach gehöriger Reduction und Vernachlässigung der Kleinen höherer Ordnung

$$= \frac{\delta\ n^2\ y\ G}{91{,}2\ g}$$

der Hebelsarm dieser Kraft für den Punkt A ist = p und ihr statisches Moment:

$$= \frac{\delta\ n^2\ y\ p\ G}{91{,}2\ g}$$

somit die Gleichgewichtsbedingung

$$\frac{\delta\ n^2\ y\ p\ G}{91{,}2\ g} = \frac{R\ y}{2}$$

und hieraus:

$$G = \frac{91{,}2\ g\ R}{2\ \delta\ n^2\ p} \quad \ldots\ldots \quad (13)$$

Aus Gleichung (11) findet man

$$\frac{Q}{G} = \frac{2\ n^2\ p}{91{,}2\ g} - 2$$

und aus Gleichung (13)

$$\frac{2\ n^2}{91{,}2\ g} = \frac{R}{\delta\ p\ G}$$

substituirt man diesen Werth von $\frac{2\ n^2}{91{,}2\ g}$ in die Gleichung für $\frac{Q}{G}$, so erhält man:

$$\frac{Q}{G} = \frac{R}{\delta\ G} - 2$$

und hieraus

$$\delta = \frac{R}{Q + 2\ G} \quad \ldots\ldots \quad (14)$$

und

$$Q + 2\ G = \frac{R}{\delta} \quad \ldots\ldots \quad (15)$$

sowie

$$Q = \frac{R}{\delta} - 2\ G \quad \ldots\ldots \quad (16)$$

oder, wenn man für G seinen Werth aus Gleichung (13) substituirt

$$Q = \frac{R}{\delta}\left(1 - \frac{91{,}2\ g}{n^2\ p}\right) \quad \ldots\ldots \quad (17)$$

Die Entfernung einer Kugel von der Umdrehungsachse beim niedersten Stande der Hülse sei = a, so hat man aus der Scheitelgleichung der Parabel $y^2 = 2\,p\,x$ die Höhe der Kugel über dem Scheitel, wenn $y = a$ wird

$$x = \frac{a^2}{2\,p};$$

sollen sich die Kugeln nun noch um die Hülsenverschiebung v haben, so dass ihre ganze Höhe über dem Parabelscheitel $= x + v$ ist, so ist die entsprechende Entfernung einer Kugel von der Drehachse

$$y^2 = 2\,p\,(x + v)$$

oder, wenn man für x seinen Werth $\frac{a^2}{2\,p}$ einführt

$$y^2 = a^2 + 2\,p\,v \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (18)$$

und

$$v = \frac{y^2 - a^2}{2\,p} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (19)$$

Mit den Gleichungen (11) (14) und (19) kann man für einen vorhandenen Regulator die Umdrehungszahl, den Ungleichförmigkeitsgrad und die Hülsenverschiebung berechnen, nachdem man aus zusammengehörigen Werthen von x und y

$$p = \frac{y^2}{2\,x}$$

berechnet hat.

Hat man einen neuen Regulator zu construiren, für welchen n, v, δ und R gegeben ist, so nimmt man entweder die kleinste und grösste Entfernung der Kugeln an, und findet nach Gleichung (18)

$$p = \frac{y^2 - a^2}{2\,v}$$

und dann aus Gleichung (15) den Werth von $Q + 2\,G$, aus (13) den Werth von G und aus (16) den Werth von Q.

Da p und die übrigen Dimensionen gar keinen Einfluss auf das Gesammtgewicht $Q + 2\,G$ des Regulators haben, so kann man auch p beliebig annehmen und aus den Gleichungen (13), (16) und (18) die Werthe von G, Q und y bestimmen.

Beispiel. Der Regulator Fig. 3. ist genau für die

gleichen Verhältnisse construirt, wie der Watt'sche Regulator Fig. 1; nämlich für $n = 100$; $R = 2$ Kilogramm; $\delta = \frac{1}{50}$; $v = 0{,}05$ Meter.

Wählt man $p = 1$ Meter und $a = 0{,}15$ m, so wird nach Gleichung (18) die grösste Entfernung des Kugelmittels von der Drehachse:

$$y = \sqrt{0{,}^{2}15 + 2 \cdot 0{,}05 \cdot 1} = 0{,}35 \text{ Meter},$$

nach Gleichung (15)

$$Q + 2G = \frac{2}{\frac{1}{50}} = 100 \text{ Kilogramm},$$

nach Gleichung (13)

$$G = \frac{91{,}2 \cdot 9{,}81 \cdot 2}{2 \cdot \frac{1}{50} \cdot 10000 \cdot 1} = 4{,}475 \text{ Kilogramm und}$$

$$Q = 100 - 2 \cdot 4{,}475 = 91{,}05 \text{ Kilogramm}.$$

Man sieht, dass dieser Regulator ziemlich kleiner ausfällt, als der entsprechende Watt'sche Regulator.

Durch Annahme eines kleineren a hätte man auch die Entfernung CC noch etwas kleiner bekommen können.

Die Wirkungsweise eines parabolischen Regulators ist etwas verschieden von der eines Watt'schen, wie aus der folgenden Betrachtung hervorgeht. Nimmt der Widerstand der Arbeitsmaschinen ab, so erhöht sich die Geschwindigkeit der Kraftmaschine; wenn sie die höchste zulässige Geschwindigkeit erreicht hat, hebt sich der Regulator und regulirt, bis die Kraft der Kraftmaschine gleich dem Widerstande der Arbeitsmaschine wird. Wäre kein Schwungrad vorhanden, so müsste von diesem Zeitpunkt an der Regulator zwar seine Höhenlage behalten, aber sich in dieser Lage mit der normalen Geschwindigkeit bewegen; durch das Schwungrad wird in dem Augenblicke, wo die Kraft gleich dem Widerstande wird, die Maschine noch die höchste erreichte Geschwindigkeit haben, die den Regulator veranlasst, sich noch mehr zu heben, bis endlich durch das übermässige Reduciren der Kraft die lebendige Kraft des Schwungrades aufgezehrt wird und

die Geschwindigkeit bis zur normalen herabsinkt. Weil die Kraft aber schon zu sehr reducirt ist, wird die Geschwindigkeit noch mehr fallen und das Spiel wird sich immer fort wiederholen, bis wieder eine Kraftänderung eintritt.

Um diesen Uebelstand zu beseitigen, haben Smith und Jackson in Keighley einen Apparat construirt, der in Fig. 4 mit einer kleinen Verbesserung abgebildet ist.*)

A ist ein cylindrisches Gehäuse, in welchem sich 2 Spiralfedern B und C befinden, die weder gespannt noch gepresst sind, wenn die Scheibe D sich in der Mitte des Gehäuses befindet. Die Scheibe D steht durch eine Stange E mit dem Kolben F in Verbindnng, welcher sich in dem mit einer Flüssigkeit gefüllten Cylinder so bewegen kann, dass die Flüssigkeit zwischen dem Kolben und der Gefässwand durchgehen kann. Die Zugstange H endlich ist mit einem Ende an der Federhülse A und mit dem andern an der Regulatorhülse befestigt, so dass sich beide gemeinschaftlich heben und senken müssen. Bei normaler Stellung des Regulators steht die Scheibe D in der Mitte des Federgehäuses A und der Kolben F in der Mitte des Cylinders G. Hebt sich die Regulatorhülse, so wird die Flüssigkeit dem schnellen Heben des Kolbens F einen beträchtlichen Widerstand entgegensetzen, und er wird sich nur langsam heben; da aber das Gehäus A sich heben muss, wenn im Regulator eine ziemlich grosse überschüssige Centrifugalkraft vorhanden ist, so wird die Feder C sich so lange zusammendrücken, bis der, dadurch in der Stange H erzeugte Zug ein weiteres Steigen der Regulatorhülse unmöglich macht. Durch den Druck der Feder C wird sich der Kolben F allmählig heben, bis die Feder C keine Spannung mehr hat. Hat sich anfänglich die

*) Eine ausführliche Beschreibuug dieses Apparates findet sich in Engincering, Band 8. Seite 45.

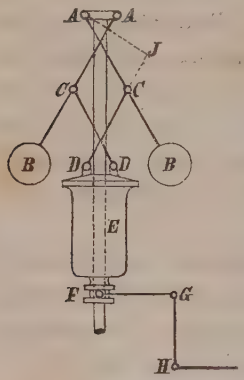
Regulatorhülse zufällig gerade so weit gehoben, dass das Gleichgewicht zwischen Kraft und Last hergestellt wurde, und hat der Kolben zu seiner allmähligen Hebung gerade so lange gebraucht, dass die überschüssige Kraft des Schwungrades in dieser Zeit aufgezehrt wurde, so ist die Regulirung eine vollständige und der Regulator wird sich mit normaler Geschwindigkeit fortbewegen.

Ist jedoch, wie es gewöhnlich sein wird, dieser Zufall nicht eingetreten, und hat der Regulator die Kraft noch nicht genug vermindert, so wird nach einigem Heben des Kolbens die Federspannung so weit nachlassen, dass sich die Regulatorhülse allmählig noch mehr heben und die Kraft der Maschine noch mehr vermindern kann, bis die richtige Stellung eintritt. Es ist jedoch auch der Fall denkbar, dass trotz der Feder die Regulatorhülse sich allmählig zu hoch hebt; in diesem Falle wird der Regulator nach kurzer Zeit wieder durch die Feder herabgezogen werden, wenn sie noch gespannt ist, hat sie aber keine Spannung mehr, so wird der Regulator erst dann fallen, wenn die Geschwindigkeit unter die normale gefallen ist.

Man sieht also, dass dieser Regulator des Regulators auch nur in Ausnahmsfällen eine ganz richtige Regulirung herbeiführen kann, im Allgemeinen aber die Schwankungen des Regulators in engeren Grenzen halten wird, wie man sie bei dem Watt'schen Regulator ohne besonderen Apparat hat.

Regulator mit gekreuzten Armen.

Da die Herstellung des parabolischen Regulators etwas schwierig und theuer ist, so zieht man es vor, einen Regulator anzuwenden, dessen Kugeln sich auf Kreisbögen bewegen, die sich der Parabel so nahe wie möglich anschliessen, und hat dann die Eigenschaften des parabolischen Regulators mit der Einfachheit des Watt'schen vereinigt.



Einen solchen Regulator zeigt Fig. 5; derselbe unterscheidet sich vom Watt'schen blos dadurch, dass die Kugelarme AB gekreuzt und in 2 Punkten A statt in einem aufgehängt sind. Damit die Hülsenstangen auch immer den gleichen Ausschlagwinkel haben wie die Arme, so sind auch sie ganz ebenso gekreuzt und an 2 Punkten D der Hülse befestigt.

Unter Beibehaltung der gleichen Bezeichnungen, wie für den Watt'schen Regulator hat man, wenn man noch mit c den Abstand der Punkte A und D von der Drehachse bezeichnet, die Entfernung einer Kugel von der Drehachse $= a \sin \alpha - c$, und die Centrifugalkraft einer Kugel

$$= \frac{n^2}{91{,}2\ g}\ G\ (a \sin \alpha - c)$$

der Hebelsarm dieser Kraft für den Punkt A, an welchem diese Kugel hängt, ist $= a \cos \alpha$, somit das statische Moment der Centrifugalkraft einer Kugel

$$= \frac{n^2\ G}{91{,}2\ g}\ (a \sin \alpha - c)\ a \cos \alpha$$

das Moment der Schwerkraft einer Kugel für den Punkt a ist:

$$= G\ a \sin \alpha.$$

Das Hülsengewicht vertheilt sich gleichmässig auf die 2 Punkte D, und wirkt gerade, wie wenn es im Kreuzungspunkte der Hülsenstangen angebracht wäre. Wenn man es in zwei Compomente in der Richtung der Hülsenstangen zerlegt, so ist jede derselben $= \frac{Q}{2 \cos \alpha}$, und der Hebelsarm AJ einer solchen Compomenten für den Punkt A $=$ 2 b cos α sin α; somit das statische Moment des halben Hülsengewichtes

$$= Q\ b \sin \alpha.$$

Da die beiden Schwerkräfte in der entgegengesetzten Richtung zu drehen suchen wie die Centrifugalkraft, so muss für den Gleichgewichtszustand das statische Moment der Centrifugalkraft gleich der Summe der statischen Momente der beiden Schwerkräfte sein; die Gleichgewichtsbedingung ist also:

$$\frac{n^2\ G}{91{,}2\ g}\ (a \sin \alpha - c)\ a \cos \alpha = G\ a \sin a + Q\ b \sin \alpha.$$

und hieraus:

$$n^2 = \frac{91{,}2\ g}{a \cos \alpha - c \operatorname{ctg} \alpha} \left(1 + \frac{Qb}{Ga}\right) \quad \ldots\ldots \quad (20)$$

Um die Entfernung c der Aufhängpunkte a von der Drehachse zu bestimmen, stellt man die, beim parabolischen Regulator erfüllte Bedingung, dass der Regulator für den grössten Ausschlagwinkel genau ebensoviele Umdrehungen mache wie für den kleinsten Ausschlagwinkel. Nennt man:

α_1 und α_2 den grössten und kleinsten Ausschlagwinkel,

n_1 und n_2 die diesem Winkel entsprechenden Umdrehungen, so ist nach Gleichung (20)

$$n_1^2 = \frac{91{,}2\ g}{a \cos \alpha_1 - c \operatorname{ctg} a_1} \left(1 + \frac{Qb}{Ga}\right)$$

und

$$n_2^2 = \frac{91{,}2\ g}{a \cos \alpha_2 - c \operatorname{ctg} \alpha_2} \left(1 + \frac{Qb}{Ga}\right)$$

und hieraus, weil $n_1 = n_2$ sein soll, nach einiger Reduction

$$\frac{1}{a \cos \alpha_1 - c \operatorname{ctg} \alpha_1} = \frac{1}{a \cos \alpha_2 - c \operatorname{ctg} \alpha_2};$$

woraus man findet

$$c = a \frac{\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1}{\operatorname{ctg} \alpha_2 - \operatorname{ctg} \alpha_1} \quad \ldots \ldots \quad (21)$$

Da der Kreisbogen bei grosser Differenz zwischen dem grössten und kleinsten Ausschlagwinkel etwas von der Parabel abweichen wird, so wird auch der Werth von $n_1 = n_2$ nicht genau gleich dem Werthe n sein, welcher der mittleren Stellung des Regulators entspricht. Aus den Werthen für n^2 und $n_1{}^2$ findet man

$$\frac{n_1{}^2}{n^2} = \frac{a \cos \alpha - c \operatorname{ctg} \alpha}{a \cos \alpha_1 - c \operatorname{ctg} \alpha_1},$$

und wenn man für c seinen Werth aus Gleichung (21) substituirt

$$\frac{n_1{}^2}{n^2} = \frac{\cos \alpha \, (\operatorname{ctg} \alpha_2 - \operatorname{ctg} \alpha_1) - \operatorname{ctg} \alpha \, (\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1)}{\cos \alpha_1 \operatorname{ctg} \alpha_2 - \operatorname{ctg} \alpha_1 \cos \alpha_2} \quad (22)$$

Die Entfernung der Punkte D von dem Punkte A ist für den grössten Ausschlagwinkel $= 2 \, b \cos \alpha_1$; für den kleinsten Ausschlagwinkel $= 2 \, b \cos \alpha_2$, und die Hülsenverschiebung gleich der Differenz dieser beiden Entfernungen, also

$$v = 2 \, b \, (\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1) \quad \ldots \ldots \quad (23)$$

und hieraus, wenn man das Verhältniss $\frac{a}{b}$ gewählt hat,

$$a = \frac{a}{b} \frac{v}{2 \, (\cos \alpha_2 - \cos a_1)} \quad \ldots \ldots \quad (24)$$

Bei Eintritt der höchsten oder niedersten zulässigen Geschwindigkeit muss die Zu- oder Abnahme der Centrifugalkraft so gross sein, dass sich die Hülse bewegt. Betrachtet man eine Geschwindigkeitszunahme, so muss das Moment der Centrifugalkraftzunahme einer Kugel gleich dem Momente des halben Hülsenwiderstandes sein.

Die höchste zulässige Umdrehungszahl ist $= n \left(1 + \frac{\delta}{2}\right)$; die ihr entsprechende Centrifugalkraft

$$= \frac{n^2 \left(1 + \frac{\delta}{2}\right)^2}{91{,}2 \, g} G \, (a \sin \alpha - c);$$

die Centrifugalkraft bei normaler Umdrehungszahl ist

$$= \frac{n^2}{91{,}2\ g}\ G\ (a \sin \alpha - c),$$

und die Zunahme der Centrifugalkraft gleich der Differenz dieser beiden Centrifugalkräfte

$$= \frac{n^2 \left(\left(1 + \frac{\delta}{2}\right)^2 - 1\right)}{91{,}2\ g}\ G\ (a \sin \alpha - c).$$

Der Hebelsarm dieser Kraft für den Punkt A ist $=$ a cos α, und das statische Moment der Centrifugalkraftzunahme

$$= \frac{n^2 \left(\left(1 + \frac{\delta}{2}\right)^2 - 1\right)}{91{,}2\ g}\ G\ (a \sin \alpha - c)\ a \cos \alpha,$$

Der Widerstand R an der Hülse zerlegt sich nach den Hülsenstangen in 2 gleiche Compomente $\frac{R}{2 \cos \alpha}$. Der Hebelsarm einer solchen Kraft ist $=$ 2 b cos α sin α, und das statische Moment für den Punkt A

$$= R\ b \sin \alpha;$$

somit die Gleichgewichtsbedingung zwischen Hülsenwiderstand und Centrifugalzunahme

$$\frac{n^2 \left(\left(1 + \frac{\delta}{2}\right) - 1\right)}{91{,}2\ g}\ G\ (a \sin \alpha - c)\ a \cos \alpha = R\ b \sin \alpha$$

oder mit Vernachlässigung der Kleinen höherer Ordnung

$$\frac{\delta\ n^2}{91{,}2\ g}\ G\ (a \sin \alpha - c)\ a \cos \alpha = R\ b \sin \alpha$$

und hieraus

$$G = \frac{91{,}2\ g}{n^2} \frac{b}{a} \frac{R}{\delta\ (a \cos \alpha - c \operatorname{ctg} \alpha)} \quad \ldots\ldots\ (25)$$

Aus Gleichung (20) findet man

$$Q = \frac{a}{b}\ G \left(\frac{(a \cos \alpha - c \operatorname{ctg} \alpha)\ n^2}{91{,}2\ g} - 1\right)$$

oder, wenn man für G seinen Werth aus Gleichung (25) substituirt,

$$Q = \frac{R}{\delta} \left(1 - \frac{91{,}2\ g}{n^2\ (a \cos \alpha - c \operatorname{ctg} a)}\right) \quad \ldots\ldots\ (26)$$

Substituirt man in Gleichung (25) für $\frac{91{,}2\ g}{n^2}$ seinen Werth

$$\frac{91{,}2\ g}{n^2} = \frac{a \cos \alpha - c \operatorname{ctg} \alpha}{\left(1 + \frac{Qb}{Ga}\right)}$$

aus Gleichung (20), so hat man

$$G = \frac{b\ R}{a\ \delta \left(1 + \frac{Qb}{Ga}\right)},$$

und hieraus für die mittlere Regulatorstellung

$$\delta = \frac{R\ b}{Ga + Qa} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (27)$$

Dieser Ungleichförmigkeitsgrad ist nicht für alle Ausschlagwinkel der gleiche, wie man aus Gleichung (27) schliessen könnte, sondern er gilt blos für den Werth von α für welchen man G bestimmt hat, und Gleichung (25) zeigt, dass G für verschiedene α verschiedene Werthe haben muss um δ constant zu erhalten.

Aus den Gleichungen (25) und (26) findet man den Werth für $Q + 2\ G$

$$Q + 2\ G = \frac{R}{\delta}\left(1 + \frac{91{,}2\ g}{n^2(a \cos \alpha - c \operatorname{ctg} \alpha)}\left(\frac{2\ b}{a} - 1\right)\right) \quad (28)$$

Da man, wie oben beim Wattschen Regulator gezeigt wurde, $\frac{a}{b}$ nicht wohl grösser als 2 wählen kann, so wird $Q + 2\ G$ in Gleichung (28) für den Werth $\frac{a}{b} = 2$ seinen kleinsten Werth erreichen, es wird dann

$$Q + 2\ G = \frac{R}{\delta} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (29)$$

Wenn man einen Regulator nach diesen Formeln construiren will, so steht die Wahl von $\frac{a}{b}$ und α_2 und a_1 frei. $\frac{a}{b}$ wählt man natürlich stets $= 2$, weil für diesen Werth $Q + 2\ G$ am kleinsten wird; bei der Wahl von α_2 und α_1 ist Gleichung (22) massgebend, die angibt um wie viel n_1 und n_2 für gegebene Werthe von α_2 und α_1 von n abweichen.

Man findet für $\alpha_1 = 40^0$ und $\alpha_2 = 20^0$ aus Gleichung (21)

$$c = 0{,}111\ a$$

und aus Gleichung (22)

$$n_1 = n_2 = 1{,}03\ n.$$

Ebenso findet man für $\alpha_1 = 38^0$ und $\alpha_2 = 22^0$

$$c = 0{,}116\ a \text{ und}$$

$$n_1 = n_2 = 1{,}02\ n$$

und für $\alpha_1 = 35^0$ und $\alpha_2 = 25^0$

$$c = 0{,}121\ a$$

$$n_1 = n_2 = 1{,}008\ a$$

so lange man also mit α_1 und a_2 nicht über 35° und nicht unter 25° geht, wird der Regulator so ziemlich in allen Stellungen die gleiche Umdrehungszahl haben können.

Beispiel: Der Regulator in Fig. 5. ist für die gleichen Umstände construirt, wie die beiden vorhergehenden, nämlich für $n = 100$; $\delta = \frac{1}{50}$; $R = 2$, Kilogramm und $v = 0{,}05$ m.

Wählt man $\frac{a}{b} = 2$; $\alpha_1 = 35^0$ und α_2 25° so ist nach Gleichung (24)

$$a = \frac{2 \cdot 0{,}05}{2\ (\cos 25^0 - \cos 35^0)} = 0{,}575 \text{ m};$$

nach Gleichung (21)

$$c = 0{,}575\ \frac{\cos 25^0 - \cos 35^0}{\operatorname{ctg} 25^0 - \operatorname{ctg} 35^0} = 0{,}094 \text{ m};$$

nach Gleichung (25), wenn man für α seinen mittleren Werth $\alpha = 30^0$ setzt:

$$G = \frac{91{,}2 \cdot 9{,}81 \cdot 2}{10000 \cdot 2 \cdot \frac{1}{50}\ (0{,}575 \cos 30^0 - 0{,}094 \operatorname{ctg} 30^0)} = 13{,}5 \text{ Kilogr.}$$

nach Gleichung (28) ist

$$Q + 2\ G = \frac{2}{\frac{1}{50}} = 100 \text{ Kilogramm}$$

und

$$Q = 100 - 2 \cdot 13{,}5 = 78 \text{ Kilogramm.}$$

Der Regulator mit gekreuzten Armen theilt bei kleiner

Differenz des grössten und kleinsten Ausschlagwinkels den Fehler des parabolischen Regulators, dass er stes zuviel regulirt. Macht man die Differenz zwischen dem grössten und kleinsten Ausschlagwinkel ziemlich gross, so ist in der mittleren Stellung die Umdrehungszahl ziemlich kleiner als in der höchsten und niedersten, so, dass der Regulator nur schwer in die niederste Stellung gelangen kann. Dagegen wird der Regulator von jeder Lage aus, sobald eine Geschwindigkeitserhöhung eintritt in die höchste Lage springen, also noch ziemlich schlechter sein als der parabolische Regulator.

Recht gut wird dieser Regulator, wenn man ihn blos von seiner mittleren bis zu seiner höchsten Stellung spielen lässt und die Ausschlagwinkel so wählt, dass der Regulator in seiner mittleren Lage die niederste zulässige Umdrehungszahl macht, während seiner höchsten Lage auch die höchste zulässige Umdrehungszahl entspricht.

Beispiel. Will man für dieselben Umstände $n = 100$; $\delta = \frac{1}{50}$; $R = 2$ Kilogramm und $v = 0{,}05$ m, wie im letzten Beispiel, einen solchen Regulator construiren, so wählt man $\alpha_1 = 38°$ und $\alpha_2 = 22°$, dann wird, wie auf Seite 35 berechnet wurde, $c = 0{,}116\ a$ und $n_1 = n_2 = 1{,}02\ n$.

Nach Gleichung (24) wird a, wenn man die ganze Verschiebung von $\alpha = 30°$ bis $\alpha_1 = 38°$ bekommen muss und $\frac{a}{b} = 2$ wählt

$$a = \frac{2 \cdot 0{,}05}{2\,(\cos 30° - \cos 38°)} = 0{,}64 \text{ m};$$

c wird

$$= 0{,}116 \cdot 0{,}64 = 0{,}07424 \text{ m}.$$

Nach Gleichung (25) erhält man G, wenn man für α seinen mittleren Werth $\alpha = 30°$ setzt, und für diesen Winkel die niederste zulässige Umdrehungszahl $n = 99$ einführt.

Es ist dann:

$$G = \frac{91{,}2 \cdot 9{,}81 \cdot 2}{99^2 \cdot 2 \cdot \frac{1}{50}\,(0{,}64 \cos 30^0 - 0{,}074 \operatorname{ctg} 30^0)} = 10{,}95 \text{ Kilogr.}$$

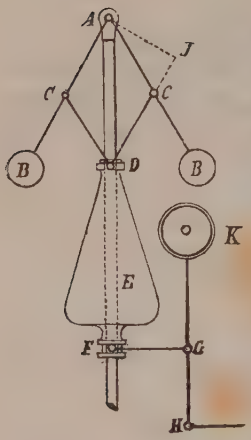
Nach Gleichung (29) ist

$$Q + 2G = \frac{2}{\frac{1}{50}} = 100 \text{ Kilogramm und}$$

$$Q = 100 - 21{,}90 = 78{,}10 \text{ Kilogramm.}$$

Dieser Regulator hat genau dieselben guten Eigenschaften, wie der gewöhnliche Wattsche Regulator und wird unter denselben Verhältnissen nicht einmal halb so gross wie jener.

Verbesserter Watt'scher Regulator.



Ein Watt'scher Regulator gestattet bei gleicher Aufhänghöhe eine viel grössere Verschiebung, wenn man wie in Fig. 6. noch ein Gewicht K auf der Verlängerung des Hebelsarmes HG anbringt. Diese Regulatoren werden namentlich in Frankreich angewandt und waren auch im Jahre 1867 auf der Pariser Ausstellung vertreten.*) Das Gewicht K muss so angebracht sein, dass es sich in der normalen Stellung des Regulators genau vertical über dem Drehpunkt G seines Hebels Gk befindet; dann hat es auch gar keinen Einfluss auf den Regulator, so lange er sich in seiner normalen Lage befindet; steigt aber der Regulator, so wird das Gewicht K ausschlagen und bei F einen Druck nach oben auf die Hülse ausüben, während es einen Druck nach unten ausübt, wenn der Regulator fällt.

Auf Seite 9 wurde für den Watt'schen Regulator die Gleichgewichtsbedingung zwischen den Schwerkräften und der Centrifugalkraft

$$\frac{G\,n^2}{91{,}2\,g}\,a^2 \sin\alpha \cos\alpha = G\,a \sin\alpha + Q\,b \sin\alpha.$$

gefunden, die sich auch wegen $h = a \cos\alpha$

$$\frac{G\,n^2}{91{,}2\,g}\,h\,a = Ga + Qb$$

schreiben lässt. In dieser Gleichung ändert sich h mit dem

*) Einige von der in Fig. 6. scizzirten Anordnung abweichende derartige Regulatoren sind im Civilingenieur von 1865 beschrieben.

Ausschlagwinkel, und zwar wird es kleiner, wenn α zunimmt, und grösser wenn es abnimmt; es wird also, wenn die Hülse steigt, das Centrifugalmoment nicht mehr im Stande sein, bei Wiedereintritt der normalen Geschwindigkeit den Gewichtsmomenten das Gleichgewicht zu halten, und man wird das Gewicht K so zu bestimmen haben, dass es gerade dieses Gleichgewicht wieder herstellt.

Es sei:

c die Länge des Hebelsarmes FG,

d die Länge des Hebelsarmes GK und

P das Gewicht von K, und alle übrigen Bezeichnungen wie oben.

Lässt man h bis h_1 abnehmen, so wird das Centrifugalmoment bei gleichbleibender Umdrehungszahl des Regulators um

$$\frac{G\ n^2}{91{,}2\ g}\ a \sin \alpha_1\ (h-h_1)$$

kleiner als die Gewichtsmomente, und die entsprechende Hülsenverschiebung wird nach Seite 12

$$v = \frac{2\ b}{a}\ (h-h_1),$$

wodurch der Ausschlag des Gewichtes P, der $= v\ \frac{d}{c}$ ist

$$= \frac{2\ b}{a}\ \frac{d}{c}\ (h-h_1)$$

wird. Dieser Ausschlag ist der Hebelsarm der Schwerkraft von P für den Punkt G, und das statische Moment von P wird für diesen Punkt

$$= \frac{2\ b\ d}{a\ c}\ P\ (h-h_1),$$

und die ihm entsprechende an der Hülse aufwärts wirkende Kraft

$$= \frac{2\ b\ d}{a\ c^2}\ P\ (h-h_1).$$

Diese Kraft zerlegt sich in der Richtung der Hülsenstangen in 2 gleiche Kräfte

$$\frac{b\ d}{a\ c^2}\ P\ \frac{(h-h_1)}{\cos \alpha_1}$$

Eine solche Kraft hat für den Punkt A den Hebelsarm

$$AJ = 2\ b \cos \alpha_1 \sin \alpha_1$$

und das statische Moment

$$= \frac{2\ b^2\ d}{a\ c^2} P\ (h - h_1) \sin \alpha_1.$$

Da dieses Moment gleich der oben gefundenen Abnahme des Centrifugalmomentes einer Kugel sein muss, so ist:

$$\frac{2\ b^2\ d}{a\ c^2} P\ (h - h_1) \sin \alpha_1 = \frac{G\ n^2}{91{,}2\ g} a\ (h - h_1) \sin \alpha_1$$

und hieraus

$$P = \frac{G\ n^2\ a^2\ c^2}{91{,}2\ g \cdot 2\ b^2\ d} \quad \ldots\ldots \quad (30)$$

oder, wenn man aus Gleichung (6) für G seinen Werth substituirt

$$P = \frac{R\ c^2}{2\ \delta\ b\ d \cos \alpha} \quad \ldots\ldots \quad (30a)$$

Diese Gleichungen für P sind blos dann richtig, wenn c seinen Werth nicht ändert, d. h. wenn man am Ende F des Hebels FG feste Zapfen anbringt, die sich in der Hülse mittelst Gleitbacken horizontal verschieben können.

Nimmt man für diesen Regulator auch den grössten und kleinsten Ausschlagwinkel der Arme an, so bekommt man wie beim letzten Regulator (Seite 32) die Hülsenverschiebung

$$v = 2\ b\ (\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1) \quad \ldots\ldots \quad (31)$$

und für ein angenommenes Verhältniss $\frac{a}{b}$ die Armlänge a für eine gegebene Verschiebung:

$$a = \frac{a}{b} \frac{v}{2\ (\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1)} \quad \ldots\ldots \quad (32)$$

Die übrigen Gewichte bestimmen sich ganz wie beim Watt'schen Regulator, also nach Gleichung (6)

$$G = \frac{91{,}2\ g}{n^2\ a \cos \alpha} \frac{b}{a} \frac{R}{\delta}$$

und nach Gleichung (8)

$$Q = \frac{R}{\delta} \left(1 + \frac{91{,}2\ g}{n^2\ a \cos \alpha}\right)$$

nach Gleichung (9)

$$Q + 2G = \frac{R}{\delta}\left(1 + \frac{91{,}2\ g}{n^2\ h}\left(\frac{2\ b}{a} - 1\right)\right).$$

Zu diesem Gewicht kommt noch das Gewicht P, so dass die Summe aller veränderlichen Gewichte

$$Q + 2G + P = \frac{R}{\delta}\left(1 + \frac{91{,}2\ g}{n^2\ h}\left(\frac{2\ b}{a} - 1\right) + \frac{c^2}{2\ b\ d \cos \alpha}\right) \quad (33)$$

wird.

Setzt man $\frac{a}{b} = 2$, was auch hier dem günstigsten Werthe der Gewichtssumme entspricht, so ist:

$$Q + 2G + P = \frac{R}{\delta}\left(1 + \frac{c^2}{2\ b\ d \cos \alpha}\right)$$

Nach diesen Formeln lässt sich ein Regulator construiren, der in allen Lagen eine nahezu gleiche Umdrehungszahl haben kann.

Ganz gleich ist die Umdrehungszahl nicht für alle Lagen, wie die folgende Betrachtung zeigen wird.

Setzt man in Gleichung (30) für n^2 seinen Werth aus Gleichung (6) so ist

$$P = \frac{a^2 c^2 G\left(1 + \frac{Qb}{Ga}\right)}{2\ b^2\ d\ a \cos \alpha}$$

Nimmt der Regulator eine höhere Stellung ein, so dass n, α und h in n_1 α_1 und h_1 übergehen, so hat man die Gleichgewichtsbedingung

$$\frac{G\ n^2}{91{,}2\ g} a^2 \sin a_1 \cos \alpha_1 + \frac{2\ b^2\ d}{a\ c^2} P\ (h - h_1) \sin \alpha_1 = G\,a \sin \alpha_1 + Qb \sin \alpha_1$$

oder, wenn man obigen Werthen von P substituirt und vereinfacht:

$$\frac{G\ n^2}{91{,}2\ g} a^2 \cos \alpha_1 + \frac{G\left(1 + \frac{Qb}{Ga}\right)(h - h_1)}{\cos \alpha} = Ga + Qb$$

und hieraus, wenn man noch für h und h_1 a cos α und a cos α_1 setzt:

$$n_1^2 = \frac{91{,}2\ g}{a \cos \alpha_1}\left(1 + \frac{Qb}{Ga}\right)\left(1 - \frac{\cos \alpha - \cos \alpha_1}{\cos \alpha}\right)$$

nach Gleichung (1) ist:

$$n^2 = \frac{91{,}2\ g}{a \cos \alpha} \left(1 + \frac{Qb}{Ga}\right)$$

also:

$$\frac{n_1^2}{n^2} = \frac{\cos \alpha}{\cos \alpha_1} \left(1 - \frac{\cos \alpha - \cos \alpha_1}{\cos \alpha}\right) \quad \ldots\ldots \quad (34)$$

Auf ganz ähnliche Weise kann man das Umdrehungszahlenverhältniss zwischen der niedersten und mittleren Stellung finden. Geht n, α und h in n_2, α_2 und h_2 über, so wird:

$$n_2^2 = \frac{91{,}2\ g}{a \cos \alpha_2} \left(1 + \frac{Qb}{Ga}\right) \left(1 + \frac{\cos a_2 - \cos \alpha}{\cos \alpha}\right)$$

und

$$\frac{n_2^2}{n^2} = \frac{\cos \alpha}{\cos \alpha_2} \left(1 + \frac{\cos \alpha_2 - \cos \alpha}{\cos \alpha}\right) \quad \ldots\ldots \quad (35)$$

Wie ganz unbedeutend der Unterschied zwischen diesen Umdrehungszahlen ist, zeigt sich an einem Zahlenbeispiel; setzt man

$\alpha = 30^0$, $\alpha_1 = 40^0$ und $\alpha_2 = 20^0$ so wird

$$n_1 = 0{,}99994\ n$$

$$n_2 = 1{,}000109\ n$$

Beispiel. Es sei wie bei den andern abgebildeten Regulatoren $n = 100$; $\delta = \frac{1}{50}$; R = 2 Kilogramm und $v = 0{,}05$ m.

Wählt man $\frac{a}{b} = 2$; $\alpha_1 = 35^0$; $\alpha_2 = 25^0$ und $\alpha = 30^0$, so ist nach Gleichung (32)

$$a = \frac{2 \cdot 0{,}05}{2\ (\cos 25^0 - \cos 35^0)} = 0{,}575 \text{ m}$$

nach Gleichung (6)

$$G = \frac{91{,}2 \cdot 9{,}81 \cdot 2}{100^2 \cdot 2 \cdot \frac{1}{50} \cdot 0{,}575 \cos 30^0} = 9 \text{ Kilogramm}$$

nach Gleichung (8)

$$Q = \frac{2}{\frac{1}{50}} \left(1 - \frac{91{,}2 \cdot 9{,}81}{100^2 \cdot 0{,}575 \cdot \cos 30^0}\right) = 82 \text{ Kilogramm.}$$

Aus Gleichung (30a), wenn man $c = 0{,}25$ m und $d = 0{,}4$ m wählt.

$$P = \frac{2 \cdot 0{,}25^2}{\frac{2}{50} \cdot 0{,}4 \cdot 0{,}2875 \cos 30^0} = 31{,}5 \text{ Kilogramm.}$$

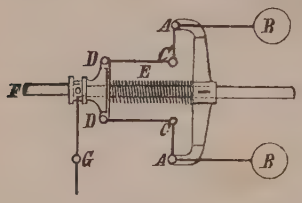
Die Gewichtssumme wird nach Gleichung (33)

$$Q + 2G + P = \frac{2}{\frac{1}{50}}\left(1 + \frac{0{,}25^2}{2 \cdot 0{,}2875 \cdot 0{,}4 \cdot \cos 30^0}\right)$$

$$= 131{,}5 \text{ Kilogramm.}$$

Federregulator.

Die sämmtlichen bisher beschriebenen Regulatoren sind blos mit verticalen Drehachsen ausführbar; es gibt jedoch Fälle, wo es einfacher und bequemer ist, wenn man den Regulator auf einer horizontalen Drehachse anbringen kann. Für einen solchen Fall hat der Verfasser den Regulator in Figur 7. construirt.*)



Auf der horizontalen Welle sitzt ein Doppelarm AA fest, und in beiden Punkten A desselben haben die 2 Winkelhebel CAB ihre Drehpunkte.

An den Enden B der Winkelhebel sitzen die Kugeln B, und von C gehen die Hülsenstangen CD nach der Hülse DD. Zwischen der Hülse DD und dem Doppelarm AA ist die Spiralfeder E eingespannt, welche je nach der Lage der Kugeln B mehr oder weniger zusammengedrückt wird. Bei F schliesst sich an die Hülse ein Hebel FG an, welcher sich um den festen Punkt G dreht, und die Bewegung der Hülse auf das Stellzeug überträgt.

Im Ruhezustand wird sich die Feder möglichst ausdehnen und die Kugeln so nahe an die Drehachse drücken als möglich; wird aber die Achse in Drehung versetzt, so werden die Kugeln durch ihre Centrifugalkraft die Feder zusammendrücken bis Gleichgewicht zwischen der Centrifugalkraft der Kugeln und dem Druck der Feder eintritt.

Bei constanter Umdrehungszahl ist die Centrifugalkraft

*) Siehe Civilingenieur von 1865.

einer Kugel einfach proportional ihrer Entfernung von der Drehachse; der Druck der Feder ist proportional der Zusammendrückung, und da die Entfernung der Kugel von der Drehachse und die Zusammendrückung der Feder stets in einem constanten Verhältniss zu einander stehen, so ist es möglich, die Feder so zu wählen, dass der Regulator innerhalb angenommener Grenzen bei gleicher Geschwindigkeit in jeder Lage im Gleichgewicht sein kann.

Nennt man:

a = AB die Armlänge des Kugelhebels bis auf die Kugelmitte gemessen.

b = AC die Armlänge des Hülsenhebebels

r_1, r und r_2 die grösste mittlere und kleinste Entfernung einer Kugel von der Drehachse.

R, G, v, δ, n und g wie oben Seite 9 und 12.

d den Durchmesser des runden Federdrahtes.

ϱ den Halbmesser der Spiralfeder von der Längenachse bis auf die Mittellinie des Drahtes gemessen.

$\mathfrak{S}$ die zulässige Spannung des Federmaterials.

K den Schubelasticitätsmodulus des Federmaterials.

u die Anzahl der Umwindungen der Feder; so ist das Moment der Centrifugalkraft einer Kugel

$$= \frac{n^2}{91{,}2\ g}\ G\ r\ a;$$

es wächst also mit r und wird für r_1 am grössten werden. Allerdings wird auch für jede Abweichung von der mittleren Lage der Hebelsarm kleiner werden, aber diese Verkleinerung braucht man nicht in die Rechnung zu ziehen, weil sie ganz in demselben Verhältniss bei AC eintritt und das Uebersetzungsverhältniss also doch immer $\frac{a}{b}$ bleibt.

Der Druck, welchen die Feder ausübt, ist

$$= \mathfrak{S}\ \frac{\pi}{16}\ \frac{d^3}{\varrho};^{*)}$$

*) Siehe »Reuleaux, Construction und Berechnung der gebräuchlichsten Federarten.«

sein Hebelsarm für den Punkt A = b und sein Moment

$$= \mathfrak{S} \frac{\pi}{16} \frac{b d^3}{\varrho}.$$

Die Schwerkraft der Kugeln übt gar keinen Einfluss auf den Gleichgewichtszustand des Regulators aus, weil die eine Kugel die Hülse ebenso stark in der einen Richtung zu verschieben sucht, wie die andere Kugel in der entgegengesetzten.

Die Hälfte des Federmomentes muss deshalb gleich dem Momente der Centrifugalkraft einer Kugel sein, wenn Gleichgewicht bestehen soll, also:

$$\frac{n^2}{91{,}2\ g} G\ r\ a = \mathfrak{S}\ \frac{\pi}{32}\ \frac{b\ d^3}{\varrho}$$

und hieraus:

$$\frac{d^3}{\varrho} = \frac{32 \cdot n^2\ G\ r\ a}{91{,}2\ g\ \mathfrak{S}\ b\ \pi} \quad \ldots\ldots \quad (36)$$

Zur Bestimmung der Federdimensionen hat man hierbei für r den grössten Werth r_1 einzuführen und hat dann

$$\frac{d^3}{\varrho} = \frac{32\ n^2\ G\ r_1\ a}{91{,}2\ g\ \mathfrak{S}\ b\ \pi} \quad \ldots\ldots \quad (36a)$$

d und ϱ sind zwar von einander abhängig, aber man kann stets die eine dieser Dimensionen ganz beliebig wählen, weil das Gewicht der Feder für gleiche Belastung und gleiche Federung constant ist.

Wenn n auf die höchste zulässige Umdrehungszahl $n\left(1 + \frac{\delta}{2}\right)$ steigt, muss das Moment der Centrifugalkraftzunahme im Stande sein den Hülsenwiderstand zu überwinden.

Die Zunahme der Centrifugalkraft für eine Zunahme von n auf $n\left(1 + \frac{\delta}{2}\right)$ ist:

$$= \frac{n^2\left(\left(1 + \frac{\delta}{2}\right)^2 - 1\right) G\ r}{91{,}2\ g},$$

oder, wenn man die Klammer auflöst und die Kleinen höherer Ordnung vernachlässigt

$$= \frac{\delta\ n^2\ G\ r}{91{,}2\ g}$$

Der Hebelsarm dieser Kraft für den Punkt A ist = a, und das Moment derselben

$$= \frac{\delta\, n^2\, G\, r\, a}{91{,}2\, g}.$$

Der Hülsenwiderstand wirkt an dem Hebelsarm b, und das halbe Moment desselben, das dem Moment der Centrifugalkraftzunahme einer Kugel gleich sein muss, ist:

$$= \frac{R\, b}{2};$$

somit die Gleichgewichtsbedingung

$$\frac{\delta\, n^2\, G\, r\, a}{91,\, 2\, g} = \frac{R\, b}{2}$$

und

$$G = \frac{91{,}2\, g\, R\, b}{2\, \delta\, n^2\, r\, a} \quad \ldots\ldots \quad (37)$$

Wenn der Ungleichförmigkeitsgrad nie grösser als δ werden soll, so muss man G für die innerste Lage bestimmen, wo das Moment der Centrifugalkraftzunahme am kleinsten ist, man hat dann

$$G = \frac{91{,}2\, g \cdot R \cdot b}{2\, \delta\, n^2\, r_2\, a} \quad \ldots\ldots \quad (37a)$$

Substituirt man diesen Werth von G in Gleichung (36a), so findet man

$$\frac{d^3}{\varrho} = \frac{16\, R\, r_1}{\mathfrak{S}\, \pi\, \delta\, r_2} \quad \ldots\ldots \quad (38)$$

Aus der Gleichgewichtsbedingung

$$\frac{\delta\, n^2\, G\, r\, a}{91{,}2\, g} = \frac{R\, b}{2}$$

ergibt sich:

$$\delta = \frac{91{,}2\, g \cdot R\, b}{2\, n^2\, G\, r\, a} \quad \ldots\ldots \quad (39)$$

und aus Gleichung (36a)

$$G = \frac{91\,2\, g \cdot d^3\, \mathfrak{S}\, b\, \pi}{32\, n^2\, r_1\, a\, \varrho}.$$

Substituirt man diesen Werth von G in die eben gefundene Gleichung für δ, so wird:

$$\delta = \frac{16\, R\, \varrho}{d^3\, \mathfrak{S}\, \pi} \cdot \frac{r_1}{r} \quad \ldots\ldots \quad (39a)$$

Diese Gleichung zeigt, dass δ umgekehrt proportional r ist; dass es also für $r = r_2$ am grössten und für $r = r_1$ am kleinsten wird.

Die Differenz $r_1 - r_2$ zwischen der grössten und kleinsten Entfernung der Kugel von der Drehachse kann man beliebig wählen. Es ergibt sich aus derselben die Hülsenverschiebung

$$v = \frac{b}{a}(r_1 - r_2) \quad \ldots\ldots \quad (40)$$

und

$$b = \frac{a \cdot v}{(r_1 - r_2)} \quad \ldots\ldots \quad (41)$$

Die zulässige Zusammendrückung der Feder ist

$$= \frac{64 \cdot u\ P\ \varrho^3}{K\ d^4}\ *)$$

wobei P den Druck auf die Feder bezeichnet; dieser Druck hat den Maximalwerth

$$P = \frac{2\ n^2\ G\ r_1\ a}{91{,}2\ g \cdot b}$$

oder, wenn man für G seinen Werth aus Gleichung (37a) substituirt:

$$P = \frac{R\ r_1}{\delta\ r_2}.$$

Setzt man diesen Werth von P in die oben gefundene Gleichung für die Zusammendrückung der Feder ein, so wird diese

$$= \frac{64\ u\ R\ r_1\ \varrho^3}{K\ d^4\ \delta\ r_2},$$

und, wenn man noch für δ seinen Werth aus Gleichung (39) einführt,

$$= \frac{4\ u\ \varrho^2\ \mathfrak{S}\ \pi\ r}{K\ d\quad r^3}$$

dieser Werth erreicht sein Maximum für $r = r_1$ und wird dann

$$= \frac{4\ u\ \varrho^2\ \mathfrak{S}\ \pi\ r_1}{K\ d\quad r_2}$$

Diese grösste Zusammendrückung der Feder setzt sich

*) Siehe »Reuleaux Construction und Berechnung der wichtigsten Federarten.«

aus der Hülsenverschiebung und aus der Zusammendrückung der Feder zusammen, die schon bei der innersten Lage der Kugeln vorhanden ist. Da die Zusammendrückung der Feder proportional der Entfernung der Kugeln von der Umdrehungsachse ist, so ist sie = 0 für die Entfernung 0 der Kugeln von der Achse. Nennt man

v_1 die Zusammendrückung der Feder für die innerste Lage der Kugel, so hat man die Proportion:

$$\frac{v}{r_1 - r_2} = \frac{v_1}{r_2}$$

und hieraus

$$v_1 = \frac{v\, r_2}{r_1 - r_2} \quad \ldots \ldots \quad (42)$$

Die ganze Zusammendrückung wird:

$$v + v_1 = v\left(1 + \frac{r_2}{r_1 - r_2}\right);$$

dieser Werth muss gleich dem oben gefundenen Werthe der Federzusammendrückung sein, also:

$$v\left(1 + \frac{r_2}{r_1 - r_2}\right) = \frac{4\, u\, \mathfrak{S}\, \pi\, \varrho^2}{K\, d}\, \frac{r_1}{r_2}$$

und hieraus:

$$u = \frac{K\, d\, v\left(\frac{r^2}{r_1 - r_2}\right) r_2}{4\, \mathfrak{S}\, \pi\, \varrho^2\, r_1} \quad \ldots \ldots \quad (43)$$

Mit diesen Gleichungen kann man für einen bestehenden Regulator den Ungleichförmigkeitsgrad nach Gleichung (39 bestimmen.

Für einen neuen Regulator bestimmt man die Dimensionen wie in folgendem Beispiele, das auf den Regulator Fig. 7. passt.

Beispiel. Es sei, wie bei allen vorhergehenden Regulatoren $n = 100$; $R = 2$ Kilogramm; $\delta = \frac{1}{50}$; $v = 0{,}05$ m.

Wählt man $\frac{a}{b} = 2{,}5$ und $r_1 - r_2 = b$, so ist:

nach Gleichung (41)

$$b = 2{,}5 \cdot 0{,}05 = 0{,}125 \text{ m}$$

und $a = 2{,}5 \cdot 0{,}125 = 0{,}3125$ m.

Wählt man noch $r_2 = 0{,}16$, so ist nach Gleichung (37a)

$$G = \frac{91{,}2 \cdot 9{,}81 \cdot 2 \cdot 0{,}125}{2 \cdot \frac{1}{50} \cdot 10000 \cdot 0{,}16 \cdot 0{,}3125} = 11{,}2 \text{ Kilogramm.}$$

Verwendet man zur Feder Gussstahl mit $K = 10300000000$ Kilogramm per Quadratmeter und $\mathfrak{S} = 40000000$ per Quadratmeter, so ist nach Gleichung (38) weil $r_1 = 0{,}16 + 0{,}125 = 0{,}285$ m ist

$$\frac{d^3}{\varrho} = \frac{16 \cdot 2 \cdot 0{,}285}{40000000 \cdot 3{,}14 \cdot \frac{1}{50} \cdot 0{,}16} = 0{,}00002264.$$

Will man Draht von 9 Millimeter Dicke verwenden, so hat man

$$\varrho = \frac{0{,}009^3}{0{,}00002264} = 0{,}0322$$

und nach Gleichung (43)

$$u = \frac{10300000000 \cdot 0{,}009 \cdot 0{,}05 \left(1 + \frac{0{,}16}{0{,}125}\right) 0{,}16}{4 \cdot 40\,000\,000 \cdot 3{,}14 \cdot 0{,}0322^2 \cdot 0{,}285} = 11{,}4.$$

Der Ungleichförmigkeitsgrad ist für diesen Regulator nach Gleichung (39a) für $r = r_2$

$$\delta = \frac{16 \cdot 2 \cdot 0{,}0322 \cdot 0{,}285}{0{,}009^3 \cdot 40\,000\,000 \cdot 3{,}14 \cdot 0{,}16} = \frac{1}{50}$$

für $r = r_1$

$$\delta = \frac{16 \cdot 2 \cdot 0{,}0322 \cdot 0{,}285}{0{,}009^3 \cdot 40\,000\,000 \cdot 3{,}14 \cdot 0{,}285} = \frac{1}{89}.$$

Nach Umständen überschreitet der letztere Werth von δ den entsprechenden Werth von δ beim Schwungrade und man muss dann andere Dimensionen wählen.

Hätte man z. B. $\frac{a}{b} = 1$ gewählt und $a = b = 0{,}15$ m; ferner $r_2 = 0{,}25$ m und $r_1 = 0{,}30$ m so wäre

$$G = 17{,}9 \text{ Kilogramm,}$$

$$\frac{d^3}{\varrho} = 0{,}0000153,$$

und bei Verwendung von 9 $\frac{m}{m}$ Stahl

$$\varrho = 0{,}0485;$$

$$u = 19{,}7 \text{ und}$$

für $r = r_2$ $\quad \delta = \frac{1}{50}$

für $r = r_1$ $\quad \delta = \frac{1}{60}$.

Diese Construction ist zwar ziemlich schwerer und erfordert auch eine längere Feder; aber im Ganzen erfordert dieser Regulator nicht mehr Raum als der oben berechnete.

Vergleichung der beschriebenen Regulatoren.

Es dürfte interessant sein, die betrachteten Regulatoren noch in Beziehung auf ihre practisch wichtigen Eigenschaften zu vergleichen.

Die erste und wichtigste Eigenschaft ist die gehörige Empfindlichkeit, d. h. das Vermögen bei Eintritt der höchsten oder niedersten zulässigen Geschwindigkeit reguliren zu können.

Diese Eigenschaft lässt sich bei allen Regulatoren herstellen, wenn man G und Q nach den oben aufgestellten Formeln berechnet; dabei könnte es jedoch vorkommen, dass die Empfindlichkeit zu gross würde, und der Regulator einen Ungleichförmigkeitsgrad einhalten will, welchen das Schwungrad nicht einhalten kann. Beim parabolischen Regulator ist der Ungleichförmigkeitsgrad in allen Lagen der gleiche; bei dem Watt'schen Regulator, dem Regulator mit gekreuzten Armen und dem verbesserten Watt'schen Regulator ist der höchste und niederste Ungleichförmigkeitsgrad ungefähr $= \delta (1 + \delta)$ und $= \delta (1 - \delta)$ also nicht bedeutend grösser oder kleiner als der mittlere Ungleichförmigkeitsgrad.

Beim Federrregulator kann δ sehr verschieden sein, wie das berechnete Beispiel zeigt; es sind deswegen die Formeln für das grösste und kleinste δ angegeben, damit der Regulator so gewählt werden kann, dass er nicht zu empfindlich wird.

Eine zweite Eigenschaft ist das schnelle Reguliren. Sämmtliche direct wirkenden Regulatoren würden schnell genug reguliren, wenn sie bei einer Geschwindigkeitsänderung nur einmal reguliren müssten, oben wurde jedoch

gezeigt, dass alle Regulatoren, welche in allen Lagen gleiche Umdrehungen machen können, zuviel reguliren müssen. Weit besser sind in dieser Beziehung die Regulatoren, welche in ihrer tiefsten Lage die niederste zulässige Geschwindigkeit und in ihrer höchsten Lage die höchste zulässige Geschwindigkeit haben, weil sie blos so lange steigen oder fallen, bis das Gleichgewicht zwischen Kraft und Last wieder hergestellt ist. Diese Eigenschaft hat der Watt'sche Regulator und die zweite Construction des Regulators mit gekreuzten Armen. Diese beiden Regulatoren sind überhaupt ihrer Einfachheit wegen allen andern vorzuziehen.

Bei indirecter Uebertragung ist eine ordentliche Regulirung gar nicht möglich, wie bei der zweiten Construction des Watt'schen Regulators gezeigt wurde. Es gibt zwar Vorrichtungen, welche dem zu starken Reguliren entgegenwirken sollen, sie sind aber nicht sicherer wirkend als die beim parabolischen Regulator beschriebene Vorrichtung, und ein guter Centrifugalregulator mit indirecter Uebertragung ist noch zu erfinden.

Eine dritte Eigenschaft ist ein geringes Gewicht und Volumen und einfache Herstellung des Regulators.

Der verbesserte Watt'sche Regulator ist am schwersten; der Federregulator am leichtesten und die übrigen Regulatoren sind bei richtiger Wahl der Dimensionen gleich schwer.

Dem Volumen nach ist der Watt'sche Regulator am ungünstigsten und der mit gekreuzten Armen am günstigsten, während die andern zwischen diesen beiden liegen.

In der Herstellung ist nicht viel Unterschied zwischen dem Watt'schen Regulator, dem verbesserten Watt'schen Regulator und dem Regulator mit gekreuzten Armen, während der Federregulator und der parabolische Regulator etwas schwieriger herzustellen sind.

Wenn man alle Eigenschaften jedes einzelnen Regulators zusammenfasst, so empfiehlt sich als der vorzüglichste

der Regulator mit gekreuzten Armen (2te Construction), dann der Watt'sche Regulator, und blos in Ausnahmsfällen der verbesserte Watt'sche und der Federregulator, die man (wenn man sie überhaupt wählt) auch so construiren müsste, dass sie in der höchsten und niedersten Lage die höchste und niederste zulässige Geschwindigkeit haben.

Der parabolische Regulator ist gar nicht zu wählen, weil er stets zu viel regulirt; er liesse sich zwar auch so umwandeln, dass er nicht in allen Lagen gleich viel Umdrehungen macht, aber dann erreicht man blos was man beim Regulator mit gekreuzten Armen viel einfacher erhält.

Berichtigungen.

Seite 11. Zeile 5 v. u. lies $h_2 - h_1 = 91{,}2\ g \dfrac{2\ \delta}{n^2\left(1-\frac{\delta^2}{4}\right)^2}\left(1+\dfrac{Qb}{Ga}\right)$

statt $h_2 - h_1 = 91{,}2\ g \dfrac{2\ \delta}{n^2\left(1-\frac{\delta^2}{4}\right)^2}\left(1+\dfrac{Qb}{Ga}\right)$.

Seite 26. Zeile 10 v. u. lies (19) statt (18).

» 34. » 7 v. o. » $\delta = \dfrac{R\ b}{Ga + Qb}$ statt $\delta = \dfrac{R\ b}{Ga + Qa}$.

» 40. » 1 v. u. » $Q = \dfrac{R}{\delta}\left(1 - \dfrac{91{,}2\ g}{n^2\ a\ \cos\ \alpha}\right)$

statt $Q = \dfrac{R}{\delta}\left(1 + \dfrac{91{,}2\ g}{n^2\ a\ \cos\ \alpha}\right)$.

» 41. » 13 v. u. » (1) statt (6).

» 41 » 4 u. 8 v. u. lies n_1^2 statt n^2.

» 49. » 12 v u. lies $u = \dfrac{K\ d\ v\left(1+\frac{r_2}{r_1 - r_2}\right)r_2}{4\ \mathfrak{S}\ \pi\ \varrho^2\ r_1}$

statt $u = \dfrac{K\ d\ v\left(\frac{r^2}{r_1 - r_2}\right)r_2}{4\ \mathfrak{S}\ \pi\ \varrho^2\ r_1}$.

Im Verlage von **Bach & Kitzinger** in **Stuttgart** sind erschienen und durch alle Buchhandlungen zu beziehen:

Hänel, Gust. A.,
Professor am K. Polytechnikum in Stuttgart,

Constructionslehre
für
Ingenieure.

Erster Theil: **Kunstbau (Brückenbau).**
Text 11 Bogen gr. 8. eleg. geh. Atlas 19 Tafeln in Folio.
Preis Rthlr. 3. oder fl. 4. 51 kr.

Constructionslehre
der
Maschinentheile
nebst Resultaten für den Maschinenbau
von
Chr. Müller,
Professor am K. Polytechnikum in Stuttgart.
20 Bogen Text in 8. Atlas 34 color. Tafeln in Folio. eleg. geh.
Preis Rthlr. 4. 12 Sgr. oder fl. 7. 21 kr.

Technologisches Skizzenbuch.

Eine system. geordnete Zusammenstellung skizzirter Zeichnungen der Oefen, Maschinen und Werkzeuge, welche bei der Darstellung von Roheisen, Schmiedeisen, Stahl, Zinn, Zink, Blei und Kupfer, sowie bei Verarbeitung der Metalle, Hölzer und Gespinnstfasern vorzugsweise in Anwendung kommen. Zum Gebrauch für technische Lehranstalten bearbeitet von

C. H. Schmidt,
Professor am K. Polytechnikum in Stuttgart.
54 Tafeln mit 1055 Figuren in qr.-Folio. geh.
Preis Rthlr. 3. oder fl. 5. 24 kr.